

681.314.6

B68

В. П. ВОЛОГДИН

Вологдин

22.31

ДЕП

1-В.И.И.

B 48

Там же опубликовано
преподавание по курсу
основ с ин. языка, на основе
2 части с Физикой

ВЫПРЯМИТЕЛИ

14.5.47
7

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

460-19

1/89 196108

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

ОБЛАСТНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА
А. С. ... И НА
ИНВ. ... БССР



P

428 650

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1932 ЛЕНИНГРАД

В. В. Заварзин

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Современный период развития электротехники характеризуется все возрастающим значением постоянного тока. Постоянный ток за последнее время вступил на путь технической и экономической конкуренции с переменным током, под знаком которого электротехникой за последние десятилетия был достигнут ряд блестящих успехов. В настоящее время перед электротехникой была выдвинута целый ряд еще более ответственных и грандиозных задач, успешное разрешение которых средствами техники переменных токов в одних случаях нерентабельно, в других — затруднительно и в третьих, наконец, вообще невозможно.

Вполне закономерным и естественным поэтому является тот усиленный интерес и те многочисленные работы, которые посвящаются в последнее время технике постоянного тока в Европе и Америке. В этой очень большой работе СССР по праву должно принадлежать первое место, ибо ни одна страна в мире не заинтересована сейчас в такой мере, как СССР, в скорейшем и в наиболее рациональном решении задачи передачи электрической энергии на большие расстояния. СССР, предвзвешивающий социалистическое строительство, обладает всеми необходимыми предпосылками для бурного роста электрификации.

Сегодня в порядке дня стоит целый ряд вопросов энергетики и электрификации, которые могут быть разрешены только средствами и методами техники постоянного тока. Одним из основных вопросов такого рода является электрификация железных дорог, имеющая для СССР огромное значение. Радиофикация Советского Союза тоже предъявляет целый ряд запросов к технике постоянного тока (питание анодов ламповых передатчиков, зарядка аккумуляторов). Возникшая относительно совсем недавно область передачи измерений на расстояние решает ряд достаточно трудных задач помощью опять-таки постоянного тока. Число такого рода примеров может быть значительно умножено.

Одним из самых основных звеньев в цепи электрических машин и аппаратуры, с помощью которых конструктивно решаются как упомянутые выше вопросы, так и многие другие, являются выпрямители, трансформирующие переменный ток в постоянный.

Техника расчета, изготовления и эксплуатации выпрямителей, несмотря на относительную ее новизну, достигла уже к настоящему моменту высокой степени совершенства. Однако специальная литература на русском языке, посвященная выпрямителям, еще очень бедна. У нас почти нет оригинальных трудов, трактующих всю проблему выпрямления переменного тока и выпрямителей в целом.

Для заполнения этого пробела ГНТИ и выпускает настоящий труд, в котором нашел свое отражение не только иностранный, но и богатый советский опыт по расчету, постройке и эксплуатации выпрямителей самых разнообразных систем.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Предисловие	стр. 3
Часть I. Физические основы выпрямителей.	
Глава I. Движение электрона в однородном поле.	
1. Атомное строение электричества	13
2. Заряд и масса электрона	14
3. Движение заряда в электрическом поле	—
4. Выражение скорости электрона в вольтах	15
5. Движение электрона в однородном поле	—
6. Движение электрона в продольном поле	16
7. Движение электрона в поперечном поле	—
8. Движение электрона в магнитном поле	17
9. Поперечное магнитное поле	—
10. Движение электрона в электрическом и магнитном полях	18
Глава II. Движение электрона в центральном поле.	
1. Строение атома	18
2. Атом водорода	19
3. Противоречие модели с электродинамикой	—
4. Стационарные орбиты	20
5. Излучение и поглощение энергии	21
6. Ионизация атома	22
7. Возбуждение и ионизация электронным ударом	—
8. Строение сложных атомов	23
9. Периферическая группа электронов	—
10. Периодические свойства элементов	25
11. Молекулы	27
12. Ионизация молекул	—
13. Движение электронов в газе	28
14. Поступательная и истинная скорости электрона	29
15. Неупругий удар	—
16. Вероятность ионизации	30
17. Строение ионов	—
Глава III. Испускание электронов металлами.	
1. Прохождение тока через металл	31
2. Выход электрона из поверхности металла	32
3. Теория двойного слоя	—
4. Теория поверхностного натяжения для свободных электронов	33
5. Испускание электронов раскаленными телами	—
6. Формула Ричардсона	34
7. Влияние поверхностного слоя на термоэлектронное испускание	35
8. Эффект объемных зарядов. Формула Лангмюра	36
9. Испускание электронов металлами под действием света	37
10. Граничная частота	39
Глава IV. Прохождение тока через газ.	
1. Механизм прохождения тока через газ	40
2. Искра	42

	стр.
3. Самостоятельный разряд	42
4. Тлеющий разряд	43
5. Катодное падение	44
6. Анодное падение	—
7. Нормальное катодное падение	—
8. Аномальное катодное падение	47
9. Величины анодного падения	48
Глава V. Дуговой разряд.	
1. Общее описание явления	49
2. Различные формы дугового разряда	50
3. Дуги с холодным анодом	—
4. Дуги с неиспаряющимися электродами	51
5. Форма обычного дугового разряда	—
6. Светлое пятно	52
7. Температура дуги	—
8. Температура светлого пятна	53
9. Переход от тлеющего разряда к дуговому	—
10. Катодное и анодное падения	55
11. Характеристика дуги. Формула Айртри	—
12. Характеристика закрытых дуг	56
13. Встречная электродвижущая сила в дуге	57
14. Динамическая характеристика дуги	58
15. Выпрямляющее действие дуги	59
16. Распределение тока у катода	61
17. Энергетический баланс катода	62
18. Термическая теория электронного испускания на катоде	63
19. Теория светлого пятна	65
20. Катодное падение в дуге	67
Глава VI. Прохождение тока через жидкости и основы теории жидкостных выпрямителей.	
1. Ток в электролите	67
2. Поляризация	68
3. Формовка электродов	69
4. Вентильное действие	—
Глава VII. Механизм тока в твердых полупроводниках	
1. Природа тока	71
2. Ионная проводимость	72
3. Электронная проводимость	74
Часть II. Выпрямители различных типов.	
Введение. Основы вентильного действия	75
Глава I. Газовые выпрямители повышенного давления.	
1. Остриевые разрядники	76
2. Синхронные выпрямители высокого напряжения	78
Глава II. Механические выпрямители.	
1. Системы выпрямителей	80
2. Мотор генератор	—
3. Однокорный умформер	—
4. Трансвертер	82
5. Трансвертер с ионной коммутацией	83
6. Выпрямитель со ртутной струей	84
7. Механические выпрямители малой мощности (вибрационные)	86
8. К. п. д. вибрационного выпрямителя	87
9. Выпрямитель типа GR, Hydrarwerke	—
10. Выпрямитель системы Falkenthal и Koch	—

	стр.
11. Выпрямитель Tellor	88
12. Газовое пламя как выпрямитель	88

Глава III. Выпрямители с газом при пониженном давлении.

1. Выпрямители с тлеющим разрядом	89
2. Выпрямители Osgat и GEC	—
3. Газовые выпрямители с накалимым катодом	91
4. Средняя сила тока газового выпрямителя	92
5. Выпрямители с катодом Венельта	93
6. Выпрямители с затрудненным газовым разрядом	94
7. Выпрямители с магнитным контролем	95
8. Выпрямители с объемным контролем	99
9. Выпрямитель с накалимым катодом фирмы Siemens	100
10. Выпрямитель типа AFA	101
11. Выпрямитель типа Philips	102

Глава IV. Электролитические выпрямители.

1. Алюминиевый выпрямитель	102
2. Танталовый выпрямитель	103
3. Железный выпрямитель	104
4. Коллоидный выпрямитель	—

Глава V. Детекторы и твердые выпрямители.

1. Детекторы	105
2. Твердые выпрямители	107
3. Выпрямитель Грондаля	108

Часть III. Стеклоянные ртутные выпрямители.

Глава I. Общие данные.

1. Преимущества ртутных вентилей	113
2. Стеклоянные и металлические выпрямители. Амперная нагрузка	—
3. Системы стеклоянных выпрямителей	114

Глава II. Стеклоянные выпрямители с жидким ртутным катодом.

1. История	114
2. Устройство колбы	—
3. Действие стеклоянной ртутной колбы	116
4. Катод ртутной колбы	117
5. Положительный столб	—
6. Анодное падение	118
7. Материал и форма анодов	—
8. Влияние стенок анодных трубок	120
9. Падение в положительном столбе	121
10. Падение напряжения в колбе	122
11. Период обратного тока	123
12. Обратный ток	124
13. Влияние посторонних газов на обратный ток	125
14. Роль обратного тока. Распыление анодов	128
15. Обратное зажигание	129
16. Причины обратного зажигания	—
17. Обратное зажигание вследствие наличия в колбе посторонних газов	130
18. Загрязнение стенок колбы вследствие присутствия посторонних газов	131
19. Образование обратного зажигания от грязных анодов. Обработка анодов	132
20. Влияние нагрузки на обратное зажигание	133
21. Обратное напряжение	—
22. Пробивное напряжение для паров ртути	135
23. Влияние анодных трубок на пробивное напряжение	136
24. Распределение температуры по колбе и влияние его на работу колбы	137
25. Определение температуры колбы	140
26. Зависимость размеров колбы от нагрузки и обратного напряжения	142

	стр.
27. Испытание колб на обратное зажигание	143
28. Пример расчета колбы	145
29. Возникновение прямого тока. Зажигательный потенциал. Вольтамперная характеристика	—
30. Влияние стенок на зажигательный потенциал	149
31. Псевдовысокий вакуум колбы	150
32. Обкладки на трубках анодов	—
33. Работа многофазной колбы в целом	151
34. Пуск в ход колбы	152
35. Типы колб	155
36. Укупорка колб	157
37. Ртутные колбы, наполненные нейтральным газом	—
38. Колбы с катодом из ртути с оксидом из щелочно-земельных металлов	158
39. Испытание и исследование ртутных колб и выпрямительных схем	—
40. Исследование выпрямительных схем	—
41. Устройство для автоматического измерения тока возбуждения при изменениях нагрузки	159

Глава III. Стеклоплатные выпрямители с оксидным катодом (Газотроны).

1. Преимущества выпрямителей с оксидным катодом	162
2. Работа оксидного катода в атмосфере разреженного газа	—
3. Верхний предел давления газа в выпрямителях с оксидным катодом	163
4. Выпрямитель GEC Rectron	165
5. Особенности работы выпрямителей с царами, не насыщающими пространство	166
6. Падение напряжения в выпрямителях типа Rectron	167
7. Устройство катода	—
8. Сравнительные данные оксидных ртутных выпрямителей и кенотронов, и данные Rectron'ов	168
9. Падение в Rectron'e и схема включения	169

Глава IV. Работа стеклоплатного ртутного выпрямителя.

1. Конструкция стеклоплатных ртутных выпрямительных устройств	169
2. Регулировка напряжения	170
3. Выпрямители с автоматическим управлением	—
4. Полуавтоматы для зарядки аккумуляторов	173
5. Коэффициент полезного действия стеклоплатного ртутного выпрямителя	174

Часть IV. Работа выпрямительного устройства.

Глава I. Работа выпрямителя при разных характерах нагрузки.

1. Элементарная схема с одним вентиляем. Разные случаи нагрузки	175
2. Случай 1-й. Цепь нагрузки имеет лишь ваттное сопротивление R	—
3. Случай 2-й. Элементарный вентиль работает лишь на реактивную катушку с индуктивностью L . Многофазная схема для этого случая	177
4. Случай 3-й. В цепи элементарного выпрямителя включены последовательно индуктивность L и ваттное сопротивление R	178
5. Случай 4-й. Вентиль работает на сопротивление R и емкость C , включенную параллельно сопротивлению; последовательно с вентилем включена индуктивность L	—
6. Многофазная схема для случая 4-го	180
7. Графическое построение токов и напряжений для случая 4-го	184
8. Упрощенный способ определения токов и напряжений для случая 4-го при включении. Перенапряжения и перетоки	185
9. Зависимость $i_{d \max}$, $e_{с \max}$ и $i_{d \min}$ от $\frac{\delta}{\sigma}$	186
10. Пуск кенотронных устройств	188
11. Пуск ртутных выпрямительных устройств с жидким и накаливаемым катодом. Ступенчатый выключатель	189
12. Токи и напряжения для случая 4-го при установившемся режиме	190

13. Токи и напряжения для случая 4-го при включении и выключении нагрузки	195
14. Условия устойчивой работы высоковольтной коалбы для случая 4-го	201

Глава II. Схемы включения выпрямителей.

1. Зависимость схемы от характера вентили и требований, предъявляемых к нему	203
2. Одновентильная схема (однофазная)	204
3. Двухфазная схема	—
4. Схема Грэца для однофазного тока	—
5. Схема для алюминиевых выпрямителей	—
6. Многофазные схемы	205
7. Схема с засасывающим дросселем Кюблера	—
8. Схемы для высоких напряжений	—
9. Схема Грейнахера-Латура	—
10. Схемы при кенотронных и ртутных выпрямителях для радио-целей	203
11. Каскадные схемы	207
12. Многофазная схема Грэца	—
13. Схемы, применяемые в силовых ртутных выпрямительных установках	208

Часть V. Основные соотношения между токами и напряжениями в схеме выпрямления переменного тока.

Глава I. Соотношения при отсутствии индуктивности в трансформаторе и анодных цепях.

1. Постоянная и переменная составляющая выпрямленного тока при отсутствии катодного дросселя (случай 1-й гл. I, ч. IV)	210
2. Соотношения между выпрямленным током и током фазы или анода	212
3. Использование вторичной обмотки трансформатора	214
4. Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора	215
5. Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора для однофазного выпрямления при использовании обеих полуобмоток	217
6. Трехфазное выпрямление по схеме треугольник-звезда	—
7. Трехфазное выпрямление по схеме звезда-звезда	219
8. Шестифазное выпрямление по схеме треугольник-звезда	220
9. Типовая мощность трансформатора	221
10. Линейный ток и коэффициент мощности	222
11. Коэффициент мощности выпрямительного устройства	—

Глава II. Спектральные схемы включения при отсутствии индуктивности в цепях анода.

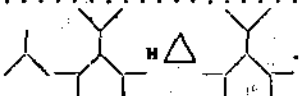
1. Шестифазное выпрямление по схеме звезда-звезда с разделительным дросселем Кюблера	223
2. Нормальная шестифазная схема звезда-звезда	226
3. Каскадная шестифазная схема	227
4. Шестифазное выпрямление по схеме Грэца	229
5. Шестифазное выпрямление по схеме треугольник-звезда с двойным зигзагом	230

Глава III. Работа трансформатора с выпрямителем.

1. Магнитная цепь трансформатора при работе его на выпрямитель	234
2. Поток утечки в одофазном трансформаторе с двухсторонним выпрямлением	—
3. Поток утечки в трехфазном стержневом трансформаторе	236
4. Поток утечки в шестифазном стержневом трансформаторе	237
5. Поток утечки в трансформаторе при специальных схемах включения	239

Глава IV. Выпрямитель с реактивными сопротивлениями, сосредоточенными в анодных цепях.

1. Принятые упрощения. Бесконечно большой реактивный катушка в катод	239
2. Переход дуги с анода на анод	240

3. Уравнения и форма анодных токов	стр. 241
4. Вид кривой напряжения выпрямленного тока при разных режимах нагрузки	243
5. Векторная диаграмма анодных напряжений многофазного выпрямителя. Вычисление угла зажигания при разных режимах нагрузки	245
6. Графическое построение кривых анодных токов при одновременном горении нескольких анодов	247
7. Предварительное зажигание фаз	251
8. Форма кривых токов в первичных обмотках трансформатора и в линии	252
9. Внешняя характеристика ртутного выпрямителя при разных нагрузках	255
10. Построение внешних характеристик из оснований выведенных соотношений	259
11. Эффективные значения тока ш-фазного выпрямителя при наличии индуктивности в цепях анода	260
12. Токи и мощность трансформатора в схемах 	262
13. Схемы питания с разделительной катушкой	265
14. Роль реактивных катушек в цепях ртутно-выпрямительных установок	268

Часть VI. Металлические ртутные выпрямители.

Историческая справка	269
Глава I. Основные элементы установки с ртутными выпрямителями в металлических сосудах	270
Глава II. Обратные зажигания в металлических сосудах ртутных выпрямителей и конструктивные меры борьбы с ними.	
1. Особенности работы металлических ртутных выпрямителей с точки зрения обратного зажигания	273
2. Материалы	274
3. Охлаждение	275
4. Катод и его защита	—
5. Аноды и защита путей дуги между анодом и катодом	277
6. Формовка выпрямителя	—
Глава III. Выпрямители завода «Электросила» (ВЭО)	
1. Типы выпрямителей	278
2. Вакуумный сосуд	—
3. Конструкция катода	279
4. Охлаждение	—
5. Устройство анодов и их вводов	280
6. Зажигание и возбуждение выпрямителей ВЭО	281
7. Схема электрических соединений ртутного выпрямителя ВЭО	283
8. Наружный вид выпрямителей ВЭО	—
Глава IV. Особенности конструкций металлических выпрямителей некоторых зарубежных фирм.	
1. Выпрямители фирмы BBC	284
2. Конструкция вакуумного сосуда и катода выпрямителей BBC	285
3. Аноды и система воздушных уплотнений выпрямителей BBC	286
4. Зажигание, возбуждение и электрическая схема выпрямителей фирмы BBC	287
5. Выпрямители фирмы AEG	288
6. Выпрямители фирмы SSW	291
7. Выпрямители фирмы Bergmann	294
Глава V. Вакуумная аппаратура металлических ртутных выпрямителей.	
1. Насосы предварительного разрежения для ртутных выпрямителей	296
2. Ртутные конденсационные насосы, применяемые для достижения и поддержания вакуума в металлических сосудах ртутных выпрямителей	298

3. Вакуумные хранилища	301
4. Измерение вакуума	303
5. Электрический вакуумметр	305

Глава VI. Краткие сведения из теории вакуумной техники.

1. Производительность вакуумных насосов. Построение их характеристик	306
2. Влияние вакуумных труб на производительность разрежающих насосов	303

Глава VII. Системы охлаждения ртутных выпрямителей.

Глава VIII. Характеристики допускаемых нагрузок выпрямителей при разных выбранных напряжениях	314

Глава IX. Параллельная работа ртутных выпрямителей.

Глава X. Регулирование напряжения ртутных выпрямителей.

Глава XI. Защита ртутно-выпрямительных установок от коротких замыканий.

1. Общие замечания	322
2. Принцип действия быстродействующих автоматов постоянного тока	323
3. Быстродействующий автомат завода «Электросила»	325
4. Схемы селективной защиты ртутных выпрямителей	327

Глава XII. Схемы соединений ртутно-выпрямительных установок металлической конструкции.

1. Общие соображения	326
2. Схема завода «Электросила»	330

Часть VII. Электронные выпрямители (кенотроны).

Глава I. Основы работы выпрямителя.

1. Общая характеристика работы выпрямителя	335
2. Объемный заряд между плоскими электродами	337
3. Объемный заряд между цилиндрическими электродами	—
4. Влияние магнитного поля тока накала катода на его эмиссию	339
5. Холодный ход, нагрузка и короткое замыкание выпрямителя	341
6. Работа выпрямителя на другой электронный прибор (трубка Кулиджа)	344
7. Последовательное соединение электронных приборов и сложная схема выпрямления А. А. Чернышова	345

Глава II. Расчет катода.

1. Типы катодов и общая характеристика материалов катода	346
2. Физические свойства вольфрама как материала и его характеристики	349
3. Приближенное математическое выражение характеристик вольфрама	352
4. Метод расчета и основные формулы расчета	353
5. Учет влияния охлажденных концов катода у вводов	354
6. Определение полной эмиссии катода, действительного излучения в средней части нити и пр.	358
7. Случай расчета нити	359
8. Диаграмма М. Ситникова, для определения диаметра нити	—
9. Диаграммы, таблицы, кривые для расчета катода и пример расчета катода	361
10. Расчетные формулы и расчет вольтамперной характеристики для идеальной нити и нити действительной	368

Глава III. Срок службы вольфрамового катода.

1. Общая постановка вопроса о сроке службы катода	370
2. Зависимость срока службы от условий эксплуатации	371
3. Срок службы и изменение характеристики катода для различных условий эксплуатации	372
4. Кривые равного срока службы	384

Глава IV. Торируемый вольфрамовый катод.

стр.

1. Зависимость эмиссии от температуры и активности поверхностного слоя. 386
2. Диффузия и испарение тория и процесс тренировки торированной нити. 390
3. Распыление тория ионной бомбардировкой и способы защиты катода от распыления. 391
4. Срок службы торированного катода. 393

Глава V. Расчет поверхности анода и стеклянного баллона выпрямителя.

1. Допустимая нагрузка на анод для различных материалов. 395
2. Допустимая нагрузка на стекло и расчет размеров баллона выпрямителя. 396

Часть VIII. Различные вопросы, связанные с выпрямителями.

Глава I. Нарушения, вызываемые работой мощных выпрямителей в линиях связи, и борьба с ними. 397

Глава II. Применение вентилей для измерительных целей.

1. Термопара как выпрямитель. 400
2. Сухие выпрямители. 401
3. Электронные выпрямители. 401

Глава III. Измерительные приборы, служащие для измерений в выпрямительных устройствах. 401

- Указатель литературы. 403
- Указатель авторов. 425

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ.

1. Атомное строение электричества.

Изучение физических и химических явлений показывает, что материя имеет атомное строение. Бесчисленное множество опытов дает основание утверждать, что все существующие в природе тела состоят из отдельных атомов или из групп атомов, составляющих молекулы. Это утверждение лежит в основе атомистической теории, на которой базируется вся современная физика и химия.

Ряд экспериментальных фактов заставляет сделать подобное же заключение и относительно электричества. Перечислим вкратце те экспериментальные факты, которые подтверждают атомное строение электричества.

1. Сопоставляя количество выделившегося при электролизе вещества с количеством протекшего в цепи электричества, Фарадей установил, что каждым атомом вещества переносится вполне определенное количество электричества, равное некоторой величине e или небольшому кратному этой величины (т. е. $2e$, $3e$, 1).

2. Рядом исследователей было показано, что заряженные частицы в газах, обуславливающие проводимость последних, называемые *ионами* и состоящие из одного или нескольких атомов газа, несут на себе тот же заряд e , что и в случае электролиза.

3. Опыты Милликана и Иоффе показали, что мельчайшая заряженная масляная капля или металлическая пылинка под действием ультрафиолетового света или рентгеновских лучей теряет свой заряд определенными порциями, равными той же величине e .

4. Резерфорд, измеривший заряд α -частицы радия, показал, что заряд ее равен $2e$.

5. Наконец целый ряд опытов над катодными β -лучами радия, над положительными (канальными) лучами, над электричеством, выпускаемым раскаленными телами, показал, что и здесь мы имеем дело с порциями электричества, равными e . В приводимой таблице сопоставлены величины e , полученные при исследовании всех этих, столь разнородных на первый взгляд, физических явлений.

Из данных таблицы 1 следует, что во всех случаях и при разнообразных условиях электричество существует в виде отдельных частиц с зарядом (по самым точным измерениям)

$$e = \pm 4,774 \times 10^{-10} \text{ абс. эл. ст. ед.}$$

$$e = \pm 1,592 \times 10^{-20} \text{ абс. эл. магн. ед.}$$

¹ Величины e приведены в табл. 1

Таблица 1.

Исследуемое явление	Природа частицы	Заряд ее в абс. эд. ст. ед.	Исследователь
1. Электролиз	Атом или группа атомов	$\pm n \times 4,774 \times 10^{-10}$	Бегеман
2. Ионы в газе	Группа атомов или молекул	$\pm 4,67 \times 10^{-10}$	Бегеман
3. "	"	$\pm 4,774 \times 10^{-10}$	Милликен
4. Заряд, теряемый при освещении	—	•	
5. Заряд, испускаемый раскаленным телом	Свободные электрические заряды	$-4,774 \times 10^{-10}$	Милликен
6. β -лучи радия (медленные)	—		
7. α -лучи радия	Атом гелия	$+2 \times 4,65 \times 10^{-10}$	Резерфорд
8. "	"	$+2 \times 4,79 \times 10^{-10}$	

2. Заряд и масса электрона.

При этом оказывается, что положительные элементарные заряды всегда связаны с атомами материальных тел, отрицательное же электричество существует и вне материи в виде отдельных атомов электричества. Изучая движение электронов в электрическом и магнитном полях (более подробно этого движения мы коснемся ниже), удалось установить, что электрон обладает массой, равной приблизительно $\frac{1}{2000}$ массы самого легкого атома (водорода). Масса электрона равна.

$$m = 9 \times 10^{-28} \text{ г.}$$

3. Движение заряда в электрическом поле.

Электрон, обладая электрическим зарядом, будучи помещен в электрическое поле, подвергается действию электрических сил. Если напряжение поля E , то сила, действующая на заряд e , будет выражаться величиной $e \cdot E$, так как — по определению — силой электрического поля E называется сила, действующая на единицу положительного электричества. Сила поля может быть разложена на составляющие x , y и z по направлениям прямоугольных осей координат, откуда, путем соответствующих преобразований (выражая составляющие поле через его потенциал V), нетрудно получить в окончательной форме следующее равенство:

$$\frac{1}{2} m \cdot d(v^2) = -e \cdot dV.$$

Обе части этого равенства представляют собой дифференциал, следовательно, интегрируя от начального до конечного положения, получаем:

$$\frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2 = -e (V_1 - V_0). \quad (1)$$

4. Выражение скорости электрона в вольтах.

Это выражение позволяет нам вычислить кинетическую энергию электрона, если только известна его начальная скорость и пройденная разность потенциалов.

В частном случае, когда электрон вначале имел очень малую скорость (можно принять $v_0 \approx 0$), его энергия равна:

$$\frac{1}{2} m v^2 = -e(V_1 - V_0). \quad (2)$$

Пользуясь этим соотношением, можно вычислить ту скорость, которую имеет электрон, пройдя разность потенциалов, равную V вольт: так как

$v = \sqrt{\frac{-2eV}{m}}$; $V_{\text{вольт}} = \frac{V}{300}$ абс. эл. ст. ед.; заряд электрона e равен $-4,77 \times 10^{-10}$ абс. эл. ст. ед. и, наконец, его масса m равна 9×10^{-28} г, мы получаем:

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 4,77 \times 10^{-10} \times 10^{10}}{300 \times 9}} V = 5,948 \times 10^7 \sqrt{V \frac{\text{см}}{\text{сек}}} \approx 600 \sqrt{V \frac{\text{км}}{\text{сек}}}. \quad (3)$$

Таким образом электрон, прошедший разность потенциалов в один вольт, обладает скоростью в $5,948 \times 10^7 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$, т. е. около 600 километров в секунду.

Мы видим, что скорость электрона пропорциональна корню квадратному из пройденной разности потенциалов и определяется исключительно этой величиной. Вместе с тем в условиях опыта для ускорения электрона обычно задается определенная разность потенциалов, поэтому для сокращения часто говорят „электрон имеет скорость (или энергию) столько-то вольт“, понимая под этим сокращенным выражением ту скорость, или энергию, которую приобрел бы электрон, пройдя указанную разность потенциалов.

5. Движение электрона в однородном поле.

Уравнения движения электрона в электрическом поле принимают наиболее простой вид в случае однородного поля, т. е. такого поля, которое на всем протяжении движения электрона одинаково как по величине, так и по направлению. Такое поле имеет место между центральными частями пластин плоского конденсатора.

В этом случае, направив ось x по направлению поля E , мы можем написать уравнения движения в виде:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = eE; \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = 0; \quad m \frac{d^2 z}{dt^2} = 0$$

из которых в окончательном виде получим:

$$x = \frac{eE}{2m} t^2 + v_{0x} t; \quad y = v_{0y} t; \quad z = v_{0z} t.$$

6. Движение электрона в продольном поле.

Наиболее простым является случай так называемого продольного электрического поля (начальная скорость электрона совпадает по направлению с силой поля).

В этом случае начальная скорость может быть направлена по оси x , и уравнения примут вид:

$$x = \frac{eE}{2m} t^2 + v_0 t; \quad y = 0; \quad z = 0, \quad (4)$$

т. е. электрон будет двигаться прямолинейно и равноускоренно в направлении против поля (заряд e отрицателен).

7. Движение электрона в поперечном поле.

Несколько сложнее случай поперечного поля (начальная скорость электрона перпендикулярна направлению поля). В этом случае, направляя поперек оси x по полю, а ось y по направлению начальной скорости, получаем:

$$v_{ax} = 0; \quad v_{oy} = v_0$$

и, следовательно, уравнения движения будут иметь вид:

$$x = \frac{eE}{2m} t^2; \quad z = v_0 t. \quad (5)$$

Исключив из уравнений t , мы получим уравнение траектории, которое будет иметь вид:

$$x = \frac{eE}{2mv_0^3} z^2, \quad (5a)$$



Рис. 1. Движение электрона в поперечном поле.

т. е.

траектория будет представлять собой параболу (см рис. 1).

Последнее уравнение позволяет нам вычислить отклонение от первоначального направления для электрона, прошедшего расстояние z_1 в однородном поперечном поле.

Если напряжение поля равно $E \frac{\text{вольт}}{\text{см}}$,

$$x_1 = \frac{-4,77 \times 10^{-10} \times E}{2 \times 9 \times 10^{-28} \times v_0^3 \times 300} \times z_1;$$

в частном случае, когда $E = 1 \frac{\text{вольт}}{\text{см}}$, $v_0 = 10^{-8} \frac{\text{см}}{\text{сек.}}$, и $z_1 = 1 \text{ см}$, мы получим:

$$x = \frac{-4,77 \times 10^{-10} \times 1}{2 \times 9 \times 10^{-28} \times 10^{-16} \times 300} = -0,0884 \text{ см.}$$

Волгодонск

Д Е П

8. Движение электрона в магнитном поле.

Из закона Био и Савара мы знаем, что действие магнитного поля на элемент тока перпендикулярно направлению тока и направлению поля, а по величине равно $F = H i ds \sin(H, i)$, где H — сила магнитного поля, i — сила тока, ds — длина элемента тока и наконец $\sin(H, i)$ — синус угла между направлением тока и направлением поля.

Сила, действующая на отдельный электрический заряд e , движущийся в магнитном поле, может быть вычислена из этого же соотношения.

В самом деле, если электрический заряд движется со скоростью v , то он пройдет путь ds за время $dt = \frac{ds}{v}$; вместе с тем через любую точку отрезка пути

ds за промежуток времени dt прошел заряд e . Таким образом отрезок пути заряда можно рассматривать как элемент тока i , сила которого равна $\frac{dQ}{dt} = \frac{e}{dt} = \frac{ev}{ds}$, а направление совпадает с направлением скорости заряда (v).

Действие магнитного поля на заряд выразится следовательно:

$$F = H i ds \sin(H, i) = H \frac{ev}{ds} ds \sin(H, v) = Hev \sin(H, v) \quad (6)$$

Из этого выражения видно, что магнитное поле не действует на заряд, движущийся в направлении поля [$\sin(H, v) = 0$]; вместе с тем мы видели, что по закону Био и Савара магнитное поле действует на ток в направлении перпендикулярном как направлению тока, так и направлению поля. В случае движения отдельного заряда вместо направления тока в ур-не (6) входит направление его скорости; таким образом магнитное поле может менять только направление, но не величину скорости заряда, так как приращение скорости перпендикулярно самой скорости.

9. Поперечное магнитное поле.

Рассмотрим случай движения электрона в поперечном магнитном поле, т. е. в однородном магнитном поле, перпендикулярном направлению начальной скорости электрона. В этом случае $\sin(H, v) = 1$, и сила, действующая на заряд, будет равна $F = Hev$. Движение будет происходить все время в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. В каждый данный момент центробежная сила будет уравновешивать силу, действующую на электрон, вызванную магнитным полем,¹ т. е.

$$\frac{mv^2}{R} = Hev.$$

H , e , m , равно как и v , во время движения не меняются, откуда следует, что

¹ В виду того, что заряд электрона отрицателен, то при данном направлении поля он будет отклоняться в обратную сторону по сравнению с током, который соответствует перемещению положительных зарядов. Поэтому для определения направления, в котором отклоняется электрон в магнитном поле, полезно вместо правила левой руки пользоваться правилом правой руки, запомнив, что большой палец показывает направление отклонения электрона, если средний направлен по движению электрона, а указательный — по полю.

и R остается постоянным, т. е. электрон в этом случае будет двигаться по кругу постоянного радиуса:

$$R = \frac{mv}{He}. \quad (7)$$

Тем обстоятельством, что радиус круга, по которому движется электрон в магнитном поле, зависит как от скорости, так и от массы частицы, часто пользуются в физике как для создания пучка частиц, двигающихся со строго одинаковыми скоростями, так и для „сортировки“ заряженных частиц по их массам. (Последний метод имеет много общего с примитивным методом веяния зерна, заключающимся в том, что, зачерпнув неотвечное зерно с мякиной совком, бросают его наклонно вверх, причем более тяжелое зерно летит дальше.)

10. Движение электрона в электрическом и магнитном полях.

Остановимся еще в нескольких словах на движении электрона под действием одновременно и электрического и магнитного полей. Мы уже видели, что при движении электрона вдоль магнитного поля последнее на него никакого действия не оказывает, так что если электрическое и магнитное поля совпадают по направлению, то электрон движется так, как будто есть одно электрическое поле, т. е. равномерно-ускоренно и прямолинейно.

Довольно сложным является движение электрона под действием взаимно перпендикулярных магнитного и электрического полей. Не интегрируя для этого случая уравнений движения (что не представляет принципиальных затруднений, но требует несколько более сложных вычислений), ограничимся указанием на то, что траектория движения в этом случае будет представлять собой *циклоиду* (если электрон движется без начальной скорости). Движение это представлено на рис. 2, где ось x совпадает с направлением однородного электрического поля E , а ось y — с направлением магнитного поля H .

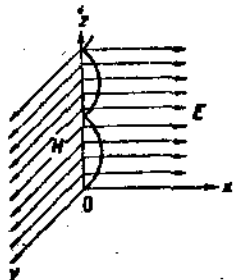


Рис. 2. Движение электрона в электрическом и магнитном полях.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛЕ.

1. Строение атома.

До сих пор мы говорили о различных случаях движения электрона — элементарной частицы отрицательного электричества. В следующей главе мы остановимся на ряде явлений, в которых исключительную роль играют именно электроны. К таким явлениям относится прохождение тока через металлы и испускание металлами электронов под действием света или высокой температуры. Вместе с тем совершенно необходимо для понимания явления прохождения тока в газах, жидкостях и твердых телах ознакомиться с тем, какую роль играют электроны в строении материи, с их нормальным положением в качестве составной части атома. Резерфорд, изучая отклонение α -частиц, испускаемых радио-

активными элементами при столкновении с атомами различных веществ, пришел к заключению, что строение атома в основных чертах напоминает строение планетной системы. В центре атома расположено ядро, имеющее положительный заряд, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Вокруг него, на чрезвычайно больших, по сравнению с их размерами, расстояниях движутся электроны, имеющие одинаковый заряд и массу. Положительный заряд ядра равен Ze , где Z — число обращающихся электронов, а e — известный нам заряд электрона. Благодаря тому, что алгебраическая сумма зарядов атома равна нулю, атом, по крайней мере на расстояниях, значительно превышающих его размеры, представляется электрически нейтральным.

Элементы отличаются друг от друга числом обращающихся вокруг ядра электронов или, что то же, величиной положительного заряда их ядра. Большинство физических и химических свойств атома, в частности, те свойства, которые связаны с процессом прохождения токов через газы, жидкости и твердые тела, зависят от движения системы электронов и от того, каким образом это движение видоизменяется под влиянием внешних воздействий. Вследствие очень большого (по отношению к их массе) заряда электронов и больших расстояний между ними и ядром, движение электронной системы в малой степени зависит от массы ядра и с чрезвычайно большим приближением определяется общим его электрическим зарядом.

Внутреннее строение ядра и то, каким образом распределены внутри его заряд и массы, играет решающую роль лишь в явлениях радиоактивности, которые в настоящем изложении остаются вне нашего рассмотрения.

2. Атом водорода.

Наиболее простым из существующих атомов является атом водорода, который представляет собой ядро, заряд которого равен элементарному заряду ($+4,744 \times 10^{-10}$ абс. эл. ст. един.), с вращающимся вокруг него единственным электроном. Сила притяжения электрона к ядру атома выражается кулоновским соотношением:

$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2}$$

(в данном случае $e_1 = e_2$) и в каждый данный момент уравнивается центробежной силой, стремящейся выбросить электрон за пределы атома.

Движение электрона представляется подобным движению планеты вокруг солнца, и это вполне естественно, так как сила притяжения как в том, так и в другом случае обратно пропорциональна квадрату расстояния. Электрон, как и планета, движется (в первом приближении) по эллипсу, в одном из фокусов которого расположено ядро. В частности одной из возможных для него орбит является круг с ядром в центре.

Более сложные атомы представляют собою системы с большим количеством электронов (у самого сложного из атомов — урана — число электронов равно 92).

3. Противоречие модели с электродинамикой.

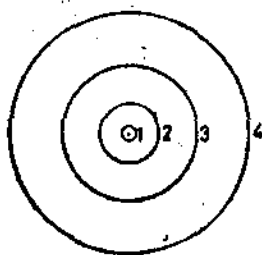
Как только мы попытаемся установить более тесную связь между свойствами атома и характером движения электронов, мы натолкнемся на очень существенное затруднение, так как оказывается, что вопреки указанной аналогии существует коренное различие между атомом и планетной системой. Согласно законам

электродинамики и электромагнитной теории света электрон, вращающийся вокруг положительного ядра, должен излучать энергию в виде электромагнитных колебаний за счет своей потенциальной энергии, т. е. приближаясь к течению времени к ядру.

Движение электрона должно быть связано с беспрестанным излучением энергии из атома, и подсчет показывает, что менее чем за одну миллионную долю секунды электрон истощил бы свою потенциальную энергию и упал в центральное ядро. Это противоречит данным опыта, которые говорят за чрезвычайно большую устойчивость движения электронов, движение которых не только „самопроизвольно“ не меняется, но и восстанавливается совершенно строго после возмущений, вызванных какими-либо внешними причинами. Для объяснения такой необыкновенной и противоречащей законам электродинамики устойчивости атомных систем пришлось сделать допущение, которое, несмотря на некоторую искусственность, оказалось настолько плодотворным, что — в соединении с некоторыми положениями о природе излучения — образовало чрезвычайно объемлющую и ценную область физики, которая носит название теории квант. Ограничиваясь теми небольшими сведениями, которые нам понадобятся для понимания процессов электропроводности, мы можем высказать положения теории квант в применении к строению атома следующим образом.

4. Стационарные орбиты.

Между всеми мыслимыми для электрона орбитами существует некоторое количество таких, которые отличаются своеобразной, необъяснимой механически, устойчивостью. Двигаясь по таким стационарным орбитам, электрон не излучает энергии. Орбиты характеризуются величиной энергии, которую надо затратить, чтобы удалить электрон с такой орбиты на бесконечно большое расстояние от атома. Эта энергия связана с зарядом ядра и электрона и с размерами орбиты соотношением:



$$W = - \frac{e_1 e_2}{r},$$

где r — радиус для круговой орбиты или большая полуось для орбиты эллиптической. Для атома водорода

$$W = - \frac{e^2}{r}.$$

Рис. 2. Схематическое изображение устойчивых орбит в атоме водорода.

Эта величина энергии для стационарных орбит теории квант должна иметь строго определенное значение, которое, согласно оптическим данным, обратно пропорционально квадрату последовательных целых чисел, т. е. равно

$$W = \frac{A}{n^2}, \quad (8)$$

где A — постоянная величина.

Отсюда и очевидно, что стационарные орбиты электронов будут иметь большие оси, пропорциональные квадратам ряда целых чисел. Рисунок 3 иллюстрирует это схематическим образом. Ради простоты из всех стационарных орбит приведены только круговые, тогда как теория не кладет никаких ограничений на

эксцентриситет орбит, определяя только длину большей оси. Нужно отметить, что потенциальная энергия электрона тем больше, чем больше радиус (или большая полуось орбиты). Нормальным состоянием атома мы называем то из состояний, в котором электрон движется по орбите с наименьшим из возможных радиусов (на рис. 3 орбита 1). Очевидно, что электрон, находящийся на этой орбите (или как часто говорят для краткости — эта орбита), обладает наименьшей потенциальной энергией.

5. Излучение и поглощение энергии.

В то время, как в стационарных состояниях никакого излучения энергии не происходит, переход электрона с одной из стационарных орбит на другую сопровождается или поглощением или испусканием энергии. Представив себе картину стационарных орбит атома водорода, мы можем сказать, что переход электрона с орбиты с большей энергией (более удаленной от ядра) на орбиту с меньшей энергией (ближние к ядру орбиты) сопровождается излучением энергии, причем эта энергия излучается в виде монохроматических колебаний (колебаний одной волны), и частота колебаний выражается следующим соотношением:

$$\nu = \frac{W_2 - W_1}{h}, \quad (9)$$

где ν — частота излучения, W_2 и W_1 — энергии атома в начальном и в конечном стационарных состояниях и, наконец, h — постоянная Планка, равная $6,547 \times 10^{-27}$ эрг · см. Такое представление превосходно объясняет вид и численные закономерности, касающиеся спектра водорода. Каждая спектральная линия соответствует колебаниям определенной частоты, излучаемым атомом при переходе электрона с одной из дальних орбит на более близкую. Нас однако интересуют главным образом обратные процессы. Мы видели, что в своем нормальном состоянии (состоянии с наименьшей потенциальной энергией) атом не может излучить энергию, так как электрон находится на самой близкой к ядру орбите.

Такой атом однако может поглотить сообщенную ему извне энергию. Можно себе представить два способа, с помощью которых эта энергия может быть атому сообщена. Это, во-первых, сообщение энергии атому в виде света, во-вторых в виде кинетической энергии ударившегося об атом тела.

Мы видели, что атом имеет ряд стационарных состояний, характеризующихся запасами потенциальной энергии W_0, W_1, W_2 , и т. д. Согласно теории квант атомом может быть поглощено то количество энергии, которое соответствует переводу электрона на одну из стационарных орбит. Таким образом атом в нормальном состоянии может поглотить только вполне определенные порции энергии: $\Delta_1 W = W_1 - W_0$; $\Delta_2 W = W_2 - W_0$ и т. д. Следовательно, если атом освещать светом, содержащим набор колебаний с различными частотами, то будут поглощаться из них те, для которых выполняются соотношения $h\nu_1 = \Delta_1 W$; $h\nu_2 = \Delta_2 W$ и т. д.

В результате такого поглощения электрон в атоме переходит со своей нормальной орбиты на одну из более удаленных и в дальнейшем при перескоке на одну из внутренних орбит сможет испустить энергию опять-таки в виде излучения. Такое состояние атома, когда он как бы заряжен некоторым дополнительным количеством энергии, которая может быть испущена в виде излучения, называется „возбужденным состоянием“.

6. Ионизация атома.

Чем больше частота излучения, которым мы освещаем атом, на тем более далекую орбиту может быть переведен электрон при поглощении. Наконец при некоторой частоте, которую мы можем назвать критической, электрон может быть вовсе удален из атома.

Такое явление называется *ионизацией* атома. Ионизированный атом, т. е. атом, лишенный своего электрона, называется *ионом*.¹ В виду того, что в нормальном своем состоянии атом водорода нейтрален, „ион“ водорода имеет положительный заряд, равный элементарному.

Явление ионизации светом делает понятным, почему газы, обычно непроходники, оказываются проводящими под действием освещения лучами короткой длины волны. Нейтральные атомы, не двигавшиеся в электрическом поле, раскалываются на положительный ион и отрицательный электрон, которые, двигаясь под влиянием электрического поля, создают перенос зарядов, т. е. прохождение тока.

7. Возбуждение и ионизация электронным ударом.

Перевод электрона с нормальной орбиты на более удаленную (возбуждение) или отрыв электрона из атома может быть выполнен и не только с помощью освещения атома светом подходящей частоты. Точно такое же действие оказывает на атом удар достаточно быстро движущейся частицы (электрона, иона), передающей ему свою кинетическую энергию, за счет которой и происходит соответствующий перескок электрона. И для этого случая сохраняет силу требование квантовой теории, которое заключается в том, что атом может поглотить энергию лишь вполне определенными порциями, соответствующими разности энергий в возбужденном (или ионизованном) и нормальном состояниях.

Поэтому медленный электрон, кинетическая энергия которого недостаточна для того, чтобы перевести электрон с нормальной до ближайшей „возбужденной“ орбиты, при столкновении с атомом не может передать ему своей кинетической энергии² и сталкивается с ним упруго. Так как главную роль играет возбуждение и ионизация атомов с помощью удара электрона, а не какой-либо материальной частицы, то дальнейшие рассуждения мы будем вести относительно ионизации и возбуждения электронным ударом. Электрон, как мы уже видели, сталкиваясь с атомом водорода, при малой скорости ударяется упруго. Увеличивая скорость или кинетическую энергию электрона [а мы их условились выражать в вольтах, см. ур-ие (3)], мы наконец достигаем значения, достаточного для перевода электрона в атоме на первую возбужденную орбиту. Это значение скорости электрона называют „первым критическим потенциалом“ или первым потенциалом возбуждения. Увеличивая скорость нашего электрона, мы достигнем второго критического потенциала и т. д. до тех пор, пока мы не дойдем до ионизации. Выраженная в вольтах разность потенциалов, которую должен пройти электрон для того, чтобы быть в состоянии ионизировать атом, называется *ионизационным потенциалом*.

¹ От греческого *ion* — „путник“, благодаря тому, что заряженный атом движется в электрическом поле.

² Количество энергии, передаваемое электроном атому, согласно уравнению удара упругих шаров, весьма мало в виду малой величины массы электрона по сравнению с массой атома.

Переходя теперь от простейшего атома — атома водорода — к строению более сложных элементов, мы должны будем ограничиться лишь самыми общими соображениями о структуре атомов.

8. Строение сложных атомов.

Атомы более сложной структуры отличаются тем, что электроны, обращающиеся вокруг ядра, распределены в виде нескольких групп, причем каждая группа характеризуется приблизительно одинаковой — для всех электронов данной группы — энергией удаления электрона с его орбиты на бесконечное расстояние.

Вместе с тем энергии орбит двух различных групп различаются очень сильно. Ближайшую к ядру связь обладает последняя (внешняя) группа. Группы обозначаются обычно большими латинскими буквами, начиная с *K*, причем группой *K* называется группа электронов, наиболее тесно связанная с ядром. С увеличением порядкового номера элемента в таблице Менделеева, т. е. с увеличением общего числа электронов в атоме, растет и число групп, в которые эти электроны объединены. Укажем число групп „внутренних“ электронов для различных элементов (в приводимой таблице не учитывается внешняя, последняя, группа, которой мы коснемся подробнее).

ТАБЛИЦА 2.

Название элементов	Общее число электронов для них	Число групп (не включая периферическую)	Название групп
От лития до неона	От 3 до 10	1	<i>K</i>
„ натрия до аргона	„ 11 „ 18	2	<i>K, L</i> ,
„ калия до криптона	„ 19 „ 36	3	<i>K, L, M</i> ,
„ рубидия до ксенона	„ 37 „ 54	4	<i>K, L, M, N</i> ,
„ цезия до урана	„ 55 „ 92	5	<i>K, L, M, N, O</i>

Для того, чтобы составить себе приблизительное представление о характере связи различных групп электронов с ядром, приведем для примера выраженную в вольтах энергию вырывания для электронов разных групп в цинке (общее число электронов равно 30; из них 2 принадлежат к группе *K*, 8 к группе *L*, 18 к группе *M* и 2 к периферической группе); соответствующие энергии вырывания (приблизленно): для электронов группы *K* — 10 000 В; для группы *L* — от 1000 до 1200 В, для группы *M* от 100 до 300 В и наконец для периферической группы (в данном случае *N*) около 10 В.

9. Периферическая группа электронов.

Очевидно, что внешняя группа электронов как по своему положению на периферии атома, так и по относительно малой величине связи с ядром наиболее подвержена всевозможным внешним воздействиям. Поэтому внутренние электроны и их расположение играют роль только в случае очень сильных и глубоких воздействий на атом (освещение лучами с очень короткой длиной

волны, бомбардировка чрезвычайно быстрыми электронами, со скоростью порядка тысяч и десятков тысяч вольт), большинство же свойств тел, как-то: 1) тепловые и связанные с агрегатным состоянием (напр. температура кипения, коэффициент линейного расширения и т. д.), 2) упругие, 3) связанные с размером атома (атомный объем), 4) магнитные, 5) оптические, 6) химические и 7) наиболее для нас существенные „электрические свойства“, связанные с взаимодействием атома с электронами небольшой скорости, всецело определяются строением периферической группы электронов, на рассмотрении которой мы и остановимся. Опыты показывают, что энергия вырывания электрона периферической группы примерно в 10—15 раз меньше, чем для предыдущей, предпоследней группы. Это дает основание заключить, что периферическая группа электронов обращается вокруг ядра по орбитам значительно более удаленным, нежели орбиты всех остальных групп. Известно, что группа заряженных точек, расположенных симметрично относительно какого-то центра, создает электрическое поле, которое на достаточно большом расстоянии от центра системы таково, как будто заряд всех частиц помещен в центре. Таким образом сила поля такой системы на некотором большом расстоянии r может быть выражена как:

$$E = -\frac{pe}{r^2},$$

где p — число точек, а e заряд каждой из них.

Так как периферические электроны достаточно удалены от внутренних электронных групп, то можно считать, что сила, действующая со стороны внутренних электронов на периферический, равна:

$$Ee = -\frac{pe^2}{r^2}.$$

Здесь p — число внутренних электронов, r — радиус орбиты внешнего электрона, а знак минус указывает на то, что эта сила будет уменьшать силу притяжения $\frac{Ze^2}{r^2}$, с которой действует на внешний электрон ядро (Z — атомный номер элемента, иначе общее число электронов атома, и следовательно Ze — заряд ядра).

Таким образом результирующая сила притяжения периферического электрона к ядру равна:

$$\frac{Ze^2}{r^2} - \frac{pe^2}{r^2} = \left(Z - p\right) \frac{e^2}{r^2}.$$

Общее число электронов в атоме Z , число электронов внутренних групп p , следовательно $Z - p = q$ есть число внешних (периферических) электронов, и сила притяжения внешних электронов к центру атома может быть выражена как

$$F = \frac{qe^2}{r^2}.$$

В частности, например, в атоме, у которого во внешней группе есть всего один электрон (т. е. $q = 1$, таков например натрий), сила притяжения этого электрона равна

$$F = \frac{qe^2}{r^2} = \frac{e^2}{r^2}.$$

т. е. такая же, как и в атоме водорода, что выражается в некотором сходстве для ряда свойств атомов упомянутых двух элементов.

Отметим еще, что при нашем приближенном подсчете мы не принимали во внимание силы взаимного отталкивания периферических электронов, которая является функцией числа этих внешних электронов, но, возрастая с увеличением q , остается все же значительно меньше нежели F ; назвав эту силу $S(q)$ мы можем теперь выписать в окончательном виде приближенное выражение для силы, притягивающей периферический электрон:

$$F = \frac{qe^2}{r^2} - S(q) \quad (10)$$

Из соотношения (10) для нас очевидно, что, с увеличением числа электронов во внешней группе, возрастают силы связи между электронами этой группы и ядром. Пренебрегая величиной $S(q)$ (более точный подсчет показывает, что мы в праве это сделать), мы можем вычислить энергию вырывания электрона периферической группы. Она равна в первом приближении:

$$W = \int_0^{\infty} \frac{qe^2}{r^2} dr = \frac{qe^2}{r} \quad (11)$$

Мы видим, что энергия вырывания электрона периферической группы пропорциональна числу электронов, принадлежащих к этой группе.

10. Периодические свойства элементов.

Опыты показывают, что максимальным возможным числом электронов периферической группы является восемь. Элементы, в которых периферическая группа электронов содержит восемь электронов, отличается большой работой вырывания периферического электрона (большим ионизационным потенциалом)¹ и связанной с этим обстоятельством малой химической активностью. Эта группа элементов называется группой благородных газов. Чем меньше число электронов в периферической группе, тем меньше та энергия, которая требуется, чтобы оторвать один из внешних электронов и, следовательно, тем легче при всяких внешних воздействиях атом теряет один из них, превращаясь в положительный ион.

Минимальным числом периферических электронов обладают водород и щелочные металлы (литий, натрий, калий, рубидий, цезий). У них имеется лишь один периферический электрон, вырывание которого сопряжено (по крайней мере для группы щелочных металлов) с очень незначительной затратой энергии (ионизационный потенциал 4—5 вольт). Это обстоятельство стоит в тесной связи с химическими свойствами этой группы элементов, которые отличаются чрезвычайно большой химической активностью, обладая типичными свойствами металлов. Следующая группа элементов, так называемые щелочно-земельные металлы, обладает уже двумя электронами в периферической группе, в силу чего их связь с ядром сильнее (ионизационный потенциал выше) и в соответствии с этим несколько меняются и их химические свойства.

Переходя к элементам с большим количеством электронов в периферической

¹ Величины ионизационных потенциалов благородных газов (приближенно): гелий — 24 вольта, неон — 20 вольт, аргон — 15 вольт, криптон — 13 вольт и ксенон 11 вольт.

группе, мы наблюдаем понижение химической активности, повышение ионизационного потенциала.

Элементы с числом периферических электронов свыше четырех вновь обнаруживают химическую активность, но уже в качестве металлоидов. Вместе с тем их ионизационный потенциал сильно растет, но у них обнаруживается способность образовывать *отрицательный* ион, путем захватывания в сферу действия электрических сил атома свободного электрона, претерпевшего с этим атомом столкновение. Выражая все эти сведения более картинно, можно сказать, что все химические элементы можно разделить на периоды, в конце которых стоят соответствующие благородные газы, имеющие наиболее совершенно построенную внешнюю группу электронов в числе восьми; каждый из электронов этой группы связан с ядром достаточно прочно, благодаря чему при всяких внешних воздействиях атом сохраняет очень большую стойкость. Остальные элементы каждого периода распадаются на две группы; одна из них с числом внешних электронов от 1 до 4 отличается тем, что при разных внешних воздействиях им легче потерять один из внешних электронов, образуя положительный ион, нежели притянуть во внешнюю сферу лишний электрон, образуя отрицательный ион. Для другой группы элементов данного периода характерны противоположные свойства. Короче говоря, при внешних воздействиях (в частности при ударах электрона об атом) элементы склонны изменить свою структуру, приближаясь по строению к соответствующему благородному газу. При этом они, если можно так выразиться, „идут по пути наименьшего сопротивления“, т. е. если у них небольшое число периферических электронов, то они теряют один из них, если же напротив число периферических электронов приближается к восьми, то атом при сообщении небольшой энергии пополняет свое число периферических электронов, становясь отрицательным ионом. Для пояснения вышесказанного приведем таблицу, которая представляет собой один период из восьми элементов, свойства которых постепенно меняются в зависимости от числа электронов периферической группы.

Таблица 3.

Название элемента	Химический знак	Число периферических электронов	Атомный № (полное число электронов)	Ионизационный потенциал (приб.) в V	Химическая характеристика
Гелий	He	0	2	25	Благородный газ
Литий	Li	1	3	5,5	Щелочный металл
Бериллий	Be	2	4	—	Щелочно-зем. металл
Бор	B	3	5	8	Неопределенные свойства
Углерод	C	4	6	—	
Азот	N	5	7	14,5	Металлоид
Кислород	O	6	8	—	Типичные металлоиды
Фтор	F	7	9	—	
Неон	Ne	8	10	20	Благородный газ

В подобные же периоды могут быть сгруппированы и все существующие элементы, причем число внешних электронов оказывается весьма характеристическим свойством, определяющим целую обширную совокупность особенностей атома.

11. Молекулы.

Если, как мы видели, только простейший атом водорода поддается более или менее точному расчету, а более сложные атомы могут быть описаны только приближено с помощью тех или иных энергетических моделей, то строение молекул представляется еще значительно более сложным, и определение характера связей атомов в молекуле, равно как и положение и формы отдельных электронных орбит представляют в настоящее время один из наиболее сложных отделов физики. Основные данные относительно строения молекул следующие: „периферические“ свойства молекулы совершенно иные, нежели у входящих в нее атомов; спектры, температура кипения, коэффициенты упругости для молекулы не стоят ни в каком соответствии со свойствами составляющих молекулу атомов. Наоборот свойства, связанные с внутренними группами электронов (напр. рентгеновское испускание и поглощение), для молекулы представляют собой сумму свойств составляющих молекулу атомов.

Эти факты указывают с несомненностью на то, что при соединении двух или нескольких атомов в молекулу движение электронов внутренних групп не претерпевает сколько-нибудь существенных изменений, в то время как периферические электроны атомов в молекуле образуют совершенно новые группировки. В частности весьма устойчивыми оказываются молекулы, в которых число электронов в периферической группе оказывается (после обмена электроном) равным восьми, причем „электронная оболочка“ ионов подобной молекулы оказывается весьма похожей на законченную периферическую группу благородного газа. Атомы, которые в комбинации могут дать подобную молекулу (например галогид фтор с семью внешними электронами и щелочной металл литий с одним), обнаруживают большое „химическое сродство“, т. е. очень легко вступают в соединения.

12. Ионизация молекул.

Подходя к вопросу о воздействии на молекулу электронного удара, надо еще раз подчеркнуть, что лишь очень немногие вопросы, связанные с распадом молекул, могут считаться окончательно решенными. Аналогично случаю столкновения с атомом электрон малой скорости, претерпевая удар о молекулу, не может передать ей своей кинетической энергии и сталкивается упруго. Увеличивая скорость ударяющегося о молекулу электрона, мы доходим до некоторой определенной величины энергии, начиная с которой электрон претерпевает удар неупругий, т. е. передает свою энергию молекуле, причем эта энергия затрачивается на перевод одного из периферических электронов с нормальной орбиты на возбужденную.

Таким образом у молекулы имеются, так же как и у атома, ряд критических потенциалов, соответствующих переводу периферического электрона на одну из более удаленных стационарных орбит.

В конце концов однако мы достигаем такой кинетической энергии электрона, которая окажется достаточной для ионизации молекулы. Процесс ионизации, точно так же как и в атоме, приводит к распаду нейтральной молекулы на заряженные части; однако в то время как в атоме при ионизации получался или положительный ион с оторванным от него электроном или, после удара об атом электрона, последний прилеплялся к нему, образуя отрицательный ион, — распад даже двухатомной молекулы может носить весьма разнообразный характер, в частности возможен отрыв электрона, причем „продуктами ионизации“

в результате будут или двухатомный положительный ион и электрон или два разноименно заряженные одноатомные иона. Заранее предсказать характер происходящих при ударе электрона о молекулу носителей электричества зачастую просто невозможно.

В заключение отметим, что большинство газов, с которыми приходится встречаться, имеют двухатомную „гомополярную“ молекулу, т. е. молекулу, состоящую из двух одинаковых атомов (например H_2 , N_2 , O_2 , и т. п.), причем о характере связи между атомами в гомополярной молекуле известно еще меньше, чем для молекул „гетерополярных“ (состоящих из различных атомов).

Одноатомными являются благородные газы и пары металлов.

13. Движение электрона в газе.

Рассмотрим теперь несколько более подробно прохождение электрона, ускоренного электрическим полем, через газ, с тем чтобы сопоставить различные случаи потери энергии и столкновений и ввести некоторые представления, оказывающиеся чрезвычайно полезными при описании этого движения.

Электрон, двигаясь в газе, претерпевает время от времени столкновения с частицами газа. Благодаря хаотическому движению последних, частота этих столкновений будет весьма различной, однако можно вывести некоторые средние величины, характеризующие движение электрона в газе, руководствуясь следующими соображениями: если на достаточно длинном пути l электрон претерпевает z столкновений, то величина $l/z = \lambda$ (называемая средней длиной свободного пути) представляет собой среднее расстояние между двумя столкновениями. Эта величина λ связана* с известной из кинетической теории газов „длиной свободного пути“ для нейтральной молекулы λ_0 следующим соотношением:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{2} \approx 5,65 \lambda_0. \quad (11a)$$

При ударе электрона о частицу газа, как мы видели, могут произойти различные действия. Наиболее просто обстоит дело в случае благородных газов и паров металлов. В этом случае (если только скорость электрона не достигает критического потенциала) столкновение имеет характер упругого удара, при котором электрон в силу своей малой массы передает лишь ничтожную часть своей кинетической энергии. Для других газов дело обстоит сложнее постольку, поскольку даже при малых скоростях удар электрона о частицу не имеет характера вполне упругого столкновения и некоторая часть столкновений электрона с частицами заканчивается прилипанием электрона к последним и образованием отрицательных ионов. Чем дальше отстоит данный элемент от начала периода таблицы элементов, тем более отличный от упругого соударения характер принимает удар электрона малой скорости, тем чаще в результате столкновения появляется отрицательный ион. В то время как, например, пары металлов и даже азот ведут себя по отношению к электронам почти как благородные газы, кислород уже сильно отличается от них, а наибольшие различия (наибольшее „сродство к электрону“) обнаруживают газы группы галогенов. Таким образом (даже при малых скоростях электронов) только относительно благородных газов и паров металлов можно с определенностью утверждать, что

* Из этого соотношения очевидно, что все закономерности, относящиеся к длине свободного пути нейтральных частиц (атомов и молекул), справедливы и для длины свободного пути электрона. В частности при постоянной температуре в широком интервале давлений справедливо соотношение $\lambda p = \text{const}$, где p — давление газа.

имеющиеся в них носители отрицательного электричества являются исключительно электронами; во всех остальных газах часть отрицательных носителей представляют собой ионы, образованные прилипанием электронов к нейтральным газовым частицам.

14. Поступательная и истинная скорости электрона.

Возвращаясь к движению электронов малой скорости в газах, обладающих алым „сродством к электрону“ (благородные газы и пары металлов), мы должны себе представить движение электрона подобным изображенному на рис. 4. Отдельные отрезки пути между двумя столкновениями представляют собой параболы (для случая равномерного поля). Достаточно представить себе траектории электрона, чтобы убедиться в том, что скорость электрона при движении по отдельным отрезкам его пути, определяемая как, известно, пройденной разностью потенциалов, совершенно отлична от средней скорости его перемещения в направлении поля. Для примера можно привести результаты упрощенного подсчета для движения электрона в аргоне, при давлении в 10 мм, поле в 5 вольт/см и начальной скорости равной нулю. Оказывается, что общая длина зигзагообразного пути электрона, прошедшего по направлению поля 1 см равна 370 см, и скорость его перемещения в направлении поля к этому моменту равна $1,8 \times 10^5$ см/сек, тогда как его истинная скорость равна $1,3 \times 10^8$ см/сек.

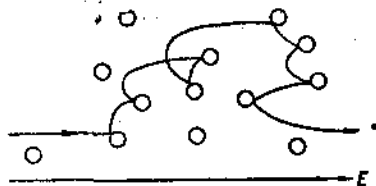


Рис. 4. Схематическое изображение траектории электрона малой скорости в газе.

Как скорость перемещения, так и истинная скорость электронов поддаются довольно подробному вычислению, которое однако вполне точно лишь в предположении абсолютно упругого удара электрона с частицей.

15. Неупругий удар.

Совершенно новые соотношения вступают в силу для электронов больших скоростей. Именно для всех газов удар электрона перестает быть упругим (если только кинетическая энергия его превышает первый критический потенциал для данного газа). Энергия движения электрона расходуется на переброску периферического электрона атома на одну из более удаленных стационарных орбит (возбуждение) или на полное удаление его из сферы действия атома (ионизация).

Здесь уместно привести величины критических и ионизационных потенциалов для некоторых газов:

Таблица 4.

Название газа	Пары щелочных металлов	Пары щелочно-земельных металлов	Ртуть	Аргон	Гелий
Первый критический потенциал в В	1,5 — 2,0	1,9 — 4,2	4,7	11,5	20,0
Потенциал ионизации в В . .	3,8 — 5,1	5,2 — 8,9	10,4	15,1	24,5

Таким образом при столкновении с нейтральной частицей (скажем с атомом) электрона, кинетическая энергия которого превышает критический или же ионизационный потенциал, электрон отдает из своей кинетической энергии часть, в точности равную работе перевода атома из одного состояния в другое. Поглощение атомом энергии может совершаться, как мы видели, лишь строго определенными порциями. Избыток энергии над поглощенной атомом (если таковой имелся) сохраняется у электрона в виде кинетической энергии.

16. Вероятность ионизации.

Для более полного представления о движении в газе электрона с относительно большой скоростью нужно добавить еще следующее: измеряя экспериментально число ионов, образованных электронами со скоростью, превышающей ионизационный потенциал, мы убеждаемся, что не каждое столкновение такого электрона с атомом приводит к образованию нового иона. Обозначая

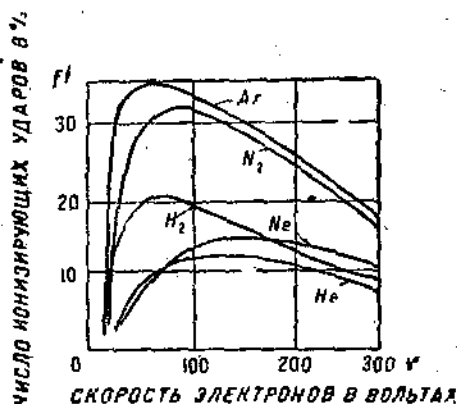


Рис. 5. Вероятность ионизации электронным ударом.

через $f_i(v)$ ту часть столкновений с атомами электронов скорости v , которые приводят к ионизации, и изучая эту величину f_i , которую можно характеризовать как «вероятность ионизации», в зависимости от скорости электронов v , мы убеждаемся, что для скоростей электронов меньших ионизационного потенциала эта величина просто равна нулю.

Дальнейший ход этой зависимости представлен для различных газов на рис. 5, на которого видно, что вероятность ионизации растет с повышением скорости электронов, достигая максимума при значении скорости около 100 вольт и затем падает вновь. Отметим, что максимальное значение, которого достигает величина $f_i(v)$, не превышает двух-трех десятых; другими словами, что даже при наиболее благоприятных для ионизации условиях только одно из четырех или пяти столкновений электрона с атомом или молекулой заканчивается ионизацией последней.

Коснемся еще в нескольких словах движения в газе ионов как положительных, образовавшихся при ударе электрона об атом путем отрыва одного из периферических электронов, так и отрицательных (электронов в благородных газах и парах металлов и атомов или молекул с «прилипшим» к их периферической группе электроном — для всех остальных газов).

17. Строение ионов.

Наблюдения над скоростью перемещения ионов, над их диффузией и т. д. показали, что ионы двигаются в газе с гораздо большим трудом, т. е. при данном поле с гораздо меньшей скоростью, нежели им следовало бы по расчету из их размеров, заряда и массы. Это обстоятельство может быть объяснено тем, что в нейтральных молекулах или атомах газа, попавших в поле одномолекулярного иона или электрона, происходит своего рода поляризация, которая заключается в том, что под действием электрической силы положительные заряды молекулы

(ядра) смещаются по полю, электронные орбиты слегка смещаются в направлении против поля, так что молекула в целом теряет свою электрическую симметрию, оказывается диполем, который, как известно, втягивается в неравномерное поле точечного заряда, благодаря чему вокруг одномолекулярного иона образуется некоторое скопление (облачко) молекул, которые увеличивают сопротивление движению иона в газе, тем самым уменьшая его подвижность.

Изложенные в главах 1-ой и 2-ой сведения о движении электронов, строении атома и образовании ионов послужат нам основой при разборе тлеющего и дугового разряда, явлений, которые применяются в целом ряде выпрямляющих устройств. Однако целый ряд устройств, служащих для той же цели, основан на испускании электронов твердыми металлами при их нагревании и при освещении. Разбором физических основ этих явлений мы и займемся в следующей главе.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ИСПУСКАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ МЕТАЛЛАМИ.

1. Прохождение тока через металл.

Для того, чтобы понять явления испускания электронов металлами под действием нагревания или освещения, нужно в нескольких словах остановиться на явлении прохождения тока через металл. Целым рядом опытов было показано, что прохождение тока в металле не сопровождается переносом вещества (т. е. что в металлах ни в малейшей степени не наблюдается явление электролиза).

Естественным выводом из этих фактов было следующее утверждение, впоследствии блестяще подтвержденное специальными опытами: „в металле ток переносится не материальными заряженными частицами (ионами), а частицами электричества, не связанными с материей (электронами)“.

Как мы видели выше, для того чтобы оторвать электрон от атома, нужно затратить некоторую энергию, которая определяется величиной „ионизационного потенциала“. Однако внутри твердого металла, благодаря особенностям взаимного расположения атомов и связанного с ним распределения втомных электрических полей, отщепление электрона происходит самопроизвольно (повидимому для ионизации атома внутри твердого металла требуется ничтожное количество энергии). Значительная часть атомов в металле все время является ионизованной, и благодаря этому имеется постоянно достаточное количество свободных электронов, которые, будучи весьма подвижными, начинают двигаться в металле, как только в нем создается извне некоторое электрическое поле. В отсутствии поля эти электроны также не находятся в покое, а двигаются хаотически, причем их средняя кинетическая энергия (всегоцело определяющаяся температурой) выражается так же, как и для частицы газа, т. е. $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$; где m — масса частицы (в данном случае — электрона), v — ее скорость, k — универсальная постоянная Больцмана, равная $1,37 \times 10^{-16} \frac{\text{эрг}}{\text{градус абс.}}$, а T — абсолютная температура;

В электрическом поле вся совокупность свободных электронов (весь „электронный газ“) начинает двигаться по направлению поля. Нужно указать, что движение этого газа происходит с некоторым трением (что объясняется столк-

новениями электронов, претерпеваемыми ими на своем пути), а поэтому, как и во всяком движении с трением, скорость перемещения электронов в направлении поля будет пропорциональна электрической силе.

Нужно отметить, что легко подвижные электроны принимают участие не только в электропроводности, но и в теплопроводности. Можно в большинстве случаев установить параллель между величинами теплопроводности и электропроводности. Так в частности диэлектрики (изоляторы), молекулы которых не распадаются самопроизвольно на ионы и электроны, являются плохими проводниками не только в электрическом, но и в термическом смысле.

2. Выход электрона из поверхности металла.

Заряжая металлы отрицательно, мы повышаем общее количество находящихся внутри него электронов, и казалось бы, что, благодаря силам взаимного расталкивания, избыточная часть электронов покинет металл, как бы испаряясь с его поверхности. Вместе с тем однако такое явление практически не имеет места. При устранении всяких побочных обстоятельств можно на поверхности металла создать огромную плотность отрицательного электричества, при чем напряжение поля достигает нескольких миллионов вольт на сантиметр без того, чтобы электроны начали срываться, повинаясь силам взаимного отталкивания. Для объяснения этого явления существуют две теории. Первая из них, называемая теорией двойного слоя, отличается многими формальными преимуществами и вместе с тем не дает окончательного, понятного толкования явлений. Другая, представляя поведение электронов на поверхности металлов подобно поведению молекул жидкости в поверхностном слое, физически вполне понятна, но несколько менее удобна формально. Нам придется ознакомиться в самых общих чертах с обеими точками зрения.

3. Теория двойного слоя.

В теории двойного слоя предполагается, что на поверхности металла имеет место скачок потенциала, который объясняется тем, что весь металл одет оболочкой двойного электрического слоя, положительные заряды которого обращены во внутрь металла, а отрицательные — наружу. Физическая сущность этого слоя не вполне ясна. Когда мы заряжаем металлы избыточным количеством электронов, то они располагаются под двойным слоем и проникнуть сквозь него не могут, так как имеющееся внутри слоя очень сильное поле препятствует прохождению сквозь него отрицательных зарядов. Однако при соприкосновении двух металлов двойной слой не образуется, благодаря чему электроны свободно переходят из одного металла в другой. Со стороны же свободных поверхностей металлы одеты двойным слоем, причем, благодаря различию в этих слоях у разных металлов (различный скачок потенциала на поверхности), между свободными поверхностями двух соприкасающихся металлов устанавливается разность потенциалов, которую называют „контактной разностью потенциалов“. Тот металл, в котором скачок потенциала у поверхности (и следовательно работа выхода электрона из металла в пустоту) меньше, будет казаться заряженным положительно относительно соприкасающегося с ним другого металла. Если расположить металлы в следующий ряд (ряд Вольта): K, Na, Al, Zn, Sn, Cd, Pb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd, то каждый из них при соприкосновении с последующим будет заряжаться положительно. Другими словами

В. В. Вильямс

работа вырывания свободного электрона будет наименьшей для калия, увеличиваясь с переходом от одного элемента приведенного ряда к другому, и достигает максимальной величины для последних металлов, т. е. платины и палладия.

4. Теория поверхностного натяжения для свободных электронов

С точки зрения второй теории — затрудненность выхода электрона через поверхность металла в пустоту объясняется подобно явлению испарения жидкости. Из молекулярной физики известно, что молекула жидкости, находящаяся внутри нее достаточно далеко от поверхностного слоя, подвергается всестороннему взаимно уравнивающемуся притяжению со стороны остальных молекул. Для молекулы, находящейся на поверхности, положение вещей меняется благодаря тому, что с одной стороны на нее действуют складывающиеся силы притяжения молекул жидкости, с другой — на нее силы не действуют, и в результате равнодействующая молекулярных сил как бы приклеивает молекулу к поверхности. Все эти соображения могут быть применены и к электрону, причем вместо сил взаимодействия между молекулами выступают силы притяжения между свободными электронами и молекулами, а также положительно заряженными ионами металла.

Контактная разность потенциалов может быть с этой точки зрения объяснена следующим образом: если мы имеем два куса различных металлов, причем сила, связывающая электрон с молекулами и ионами, в первом металле меньше, чем во втором, то при их соприкосновении второй металл начнет пересасывать в себя электроны из первого. Имевшие до начала опыта одинаковый потенциал металлы зарядятся до некоторой разности потенциалов, определяемой разностью работ вырывания электрона для первого и для второго.

В результате — разница между изложенными точками зрения сводится к тому, что по теории двойного слоя скачки потенциала имеются на внешних поверхностях металла; по второй теории весь металл в целом имеет потенциал, отличный от потенциала соприкасающегося с ним другого металла, иными словами — скачок потенциала имеет место на поверхности раздела между металлами. Опыты не позволяют решить, какая из точек зрения правильна, ибо всегда наблюдается разность потенциалов между свободными поверхностями металлов, которая получается по обеим теориям.

Для удобства изложения мы будем пользоваться терминологией теории двойного слоя, хотя она и не дает исчерпывающей картины явления.

5. Испускание электронов раскаленными телами.

Средняя скорость теплового движения для свободных электронов в металле может быть вычислена из соотношения

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT, \quad (12)$$

но тепловое движение совершенно беспорядочно, благодаря чему электроны могут иметь всевозможные скорости, сколь угодно отличающиеся от средней, вычисленной из соотношения (12). На вопрос о том, сколько электронов имеет данную скорость, отвечает статистический закон Максвелла, который гласит: число электронов dn , заключающихся в единице объема и обладающих скоростью, составляющие которой по координатным осям x , y и z имеют зна-

чения в интервалах соответственно между ξ , η , ζ и $\xi + d\xi$, $\eta + d\eta$ и $\zeta + d\zeta$, определяется соотношением:

$$dn = n e^{\frac{m(\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2)}{2kT}} d\xi d\eta d\zeta, \quad (13)$$

где n — число электронов в единице объема, m — масса электрона, k — постоянная Больцманна, равная $1,37 \times 10^{-16} \frac{\text{эрг}}{\text{градус абс.}}$, а T абсолютная температура.

Если скорость электрона достаточно велика, то он может проскочить сквозь поверхностный слой, совершив работу против электрических сил в двойном слое за счет своей кинетической энергии. При любой температуре существует некоторое количество электронов, скорость которых (вычисленная по Максвеллу) позволяет им выскочить из металла, но это испускание при обычных температурах чрезвычайно мало. Чем больше скачок потенциала в поверхностном слое металла, тем с более высоких температур явление электронного испускания делается заметным. Для Na например испускание можно заметить при 200° ,¹ в то время как для Pt оно делается заметным лишь при 900° .

6. Формула Ричардсона.

Для того, чтобы вычислить электронный ток с единицы поверхности металла, достаточно подсчитать, с помощью интегрирования формулы (13), то число электронов, для которых составляющая скорости, перпендикулярная поверхности металла, удовлетворяет соотношению:

$$\frac{1}{2} m \xi^2 \geq \Pi,$$

где Π — работа выхода электрона, т. е. Π в эргах выражается через скачок потенциала P следующим образом:

$$\Pi = \frac{Pe}{300} \quad (P \text{ в вольтах}).$$

Произведя это вычисление, получаем для числа электронов ν выражение:

$$\nu = n \sqrt{\frac{k}{2\pi m}} T^{1/2} e^{-\frac{\Pi}{kT}},$$

а сила тока с единицы поверхности (в амперах):

$$i = \nu e = a T^{1/2} e^{-\frac{b}{T}}, \quad (14)$$

где $a = \frac{n e}{3 \times 10^8} \sqrt{\frac{k}{2\pi m}}$, $b = \frac{\Pi}{k}$, $k = 1,37 \times 10^{-16} \frac{\text{эрг}}{\text{градус абс.}}$, $m = 9 \times 10^{-28} \text{ г}$, $e = 4,77 \times 10^{-10} \text{ абс. эл. ст. ед.}$, e — основание натуральных логарифмов.

Величины n (число свободных электронов в единице объема) и Π (работа вырывания электрона) различны для разных металлов.

¹ Градусы везде показаны по Цельсию.

² Ось x выбрана перпендикулярно к поверхности металла.

Ряд опытов подтвердил правильность соотношения (14), называемого „формулой Ричардсона“ по имени ученого, впервые исследовавшего явление испускания электронов раскаленными телами; тем самым подтверждается и положенное в основу вычислений соображение Максвелла о распределении скоростей электронов. Самые величины a и b однако сильно меняются в зависимости от состояния поверхности металла (в частности играет большую роль присутствие поглощенных поверхностью металла газов).

Лишь в условиях чрезвычайно тщательного обезгаживания металла, в очень высоком вакууме, удалось получить совершенно постоянные и воспроизводимые для данного металла величины a и b .

Для ряда металлов эти величины приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Металл	a	b
Вольфрам	$23,6 \times 10^6$	52 500
Тантал	$11,9 \times 10^6$	50 000
Молибден	$22,0 \times 10^6$	50 000
Платина	$11,5 \times 10^6$	51 100
Уголь	$2,4 \times 10^6$	48 700
Торий	200×10^6	39 000
Кальций	$1,76 \times 10^6$	36 500
Натрий	$1,6 \times 10^{12}$	31 600

Приведем еще некоторые данные для того, чтобы создать более наглядное представление о величине электронного испускания и его зависимости от температуры.

Для натрия $i = 10^{-3}$ ампера при 210° и $1,4 \times 10^{-2}$ ампера при 430° .

Для платины $i = 10^{-3}$ ампера при 1250° и $1,4 \times 10^{-2}$ ампера при 1500° .

7. Влияние поверхностного слоя на термоэлектронное испускание.

Из формулы Ричардсона видно, что исключительную роль при термоэлектронном испускании играет величина энергии вырывания электрона, другими словами скачок потенциала у поверхности металла, определяющий константу Π . Величина скачка потенциала P равна для чистого вольфрама 4,3 V. Оказалось, что, покрывая вольфрам очень тонким слоем соответственно подобранных составов, удается значительно понизить энергию вырывания электрона. Тем самым может быть достигнута гораздо большая эмиссия (испускание) при той же температуре или, что практически еще более важно, та же эмиссия при значительно меньшей температуре. Для увеличения эмиссии впервые было применено покрытие поверхности вольфрама окисью кальция (CaO), понижающей скачок потенциала с 4,3 V до 3,3 V, что соответствует уменьшению постоянной b от 52 500 до 40 000. Еще больший эффект оказывает применение 50 процентной смеси BaO и SrO . Этот состав дает уменьшение константы b до 24 500. Однако покрытие поверхности вольфрама указанными составами имеет тот недостаток, что по мере довольно интенсивного при высоких температурах испарения по-

вышающего эмиссию состава испускание падает до своего первоначального значения для чистого вольфрама. Более устойчивые результаты дает применение тория в виде предложенного Лангмуиром торированного вольфрама. Оказывается, что при прокаливании в вакууме вольфрама с очень маленькой примесью тория, последний вылезает на поверхность металла, образуя очень тонкий (в одну или несколько молекул) слой, который, по мере испарения пополяется изнутри до тех пор, пока не истощится все количество тория, заключенного в вольфраме.

Этот прием получил весьма широкое применение в технике маломощных пустотных приборов благодаря тому, что слой тория уменьшает константу b приблизительно до 39 000, позволяя получить довольно большой электронный ток при температуре красного каления (600 — 700°), что очень сильно удлиняет срок жизни испускателей и позволяет уменьшить затрачиваемую на нагревание энергию.

8. Эффект объемных зарядов. Формула Лангмуира.

Непосредственные измерения термоэлектронного испускания показывают, что ток с раскаленного катода в вакууме следует формуле Ричардсона лишь до определенного предела, после которого он оказывается независимым от температуры, как это видно из рис. 6. С увеличением приложенного потенциала это предельное значение тока в системе горячий катод-вакуум-анод возрастает, и ток следует формуле Ричардсона до более высокой температуры.

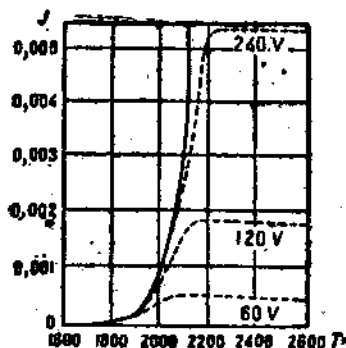


Рис. 6. Зависимость силы эмиссионного тока от температуры катода.

Это явление, с которым приходится очень считаться при тех плотностях эмиссионного тока, которые применяются в технике пустотных приборов, объясняется следующим образом: при сильном испускании вблизи катода создается отрицательный объемный заряд в виде электронного облака, который искажает распределение потенциала в поле между горячим катодом и холодным анодом и препятствует прохождению тока. Чем больше приложенная разность потенциалов, тем большее количество электронов

успевает за единицу времени отсасываться полем из облака у катода, тем меньше объемный заряд препятствует прохождению тока.

Численные соотношения, связывающие максимальный ток с приложенной разностью потенциалов, выводятся на основании следующих соображений.

Потенциал поля V связан с объемной плотностью отрицательного заряда ρ соотношением Пуассона, которое для случая электрического поля между плоскими электродами имеет вид:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = 4\pi\rho, \quad (15)$$

где x — расстояние от электрода.

Плотность заряда ρ выражается через объемную плотность тока i и скорость электрона v :

$$\rho = \frac{i}{v}; \quad (15a)$$

подставляя в ф-лу (15) выражение для φ через приложенную разность потенциалов, получаем:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = 4\pi i \sqrt{\frac{m}{2e}} \cdot \left(\frac{V}{300} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Так как увеличение испускания не сможет повести к увеличению тока с того момента, как значение силы электрического поля у поверхности катода $E = -\frac{dV}{dx}$ станет равным нулю (так как при дальнейшем увеличении испускания сила поля вблизи катода изменит знак и станет препятствовать вылету электронов), то, интегрируя уравнение (16) при условии $(V)_0 = 0$ и $\left(\frac{dV}{dx}\right)_0 = 0$, мы получим выражение для максимального тока, как функции приложенного потенциала, в виде:

$$i_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} \sqrt{\frac{e}{m}} \left(\frac{V}{300} \right)^{\frac{3}{2}}; d^2, \quad (17)$$

где d — расстояние между электродами.

Резюмируя все изложенное относительно испускания электронов раскаленными металлами, можем сказать, что плотность термоэлектронного тока, в зависимости от температуры катода, следует соотношению Ричардсона

$$i = a T^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{b}{T}}$$

до тех пор, пока не будет достигнуто значение $i_{\max}$, определяемое формулой (17) для данного потенциала.

Увеличивая приложенную разность потенциала, можем увеличить и ток электронного испускания, благодаря частичному устранению влияния объемного заряда. В настоящее время электронное испускание раскаленных металлов играет совершенно исключительную роль в технике пустотных приборов, и усилия целого ряда исследователей направлены в сторону снижения температуры катода при сохранении того же испускания (уменьшение константы b).

9. Испускание электронов металлами под действием света.

Рядом исследователей было установлено, что различные металлы, при освещении их светом короткой длины волны, испускают отрицательные электрические заряды, которые после соответствующего измерения их заряда и массы оказались электронами. Это явление, которое получило название фотоэффекта, имеет в настоящее время значительное техническое применение. Правда в

¹ Приведенное выражение для $i_{\max}$ справедливо для плоского конденсатора, одна из пластин которого является источником электронов. В случае цилиндрического конденсатора, имеющего наибольшее практическое значение, формула (17) заменяется несколько более сложным выражением

$$i_{\max} = \frac{e\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{e}{m}} \left(\frac{V}{300} \right)^{\frac{3}{2}}; \beta^2 r, \quad (17a)$$

где $\beta = \ln \frac{r}{a}$, a — радиус внутреннего, r — внешнего цилиндров. Катодом служит внутренний цилиндр.

области выпрямления переменных токов фотоэлектрические приборы не заняли большого места, главным образом благодаря тому, что испускание электронов освещенными телами по величине гораздо меньше, чем эффект Ричардсона (испускание раскаленными металлами), и поэтому мы ограничимся самым беглым знакомством с физической природой этого явления.

В главе второй, говоря о возбуждении и ионизации атома и молекул, мы упоминали о том, что изменение потенциальной энергии атома, связанное с переходом периферического электрона со своей нормальной орбиты на другую стационарную (возбуждение), или полное отрывание электрона от атома (ионизация), может произойти под влиянием освещения атома за счет энергии излучения, причем атомом поглощается количество энергии:

$$W = h\nu,$$

где ν — частота света, а h — постоянная Планка, равная $6,547 \times 10^{-27}$ эрг · сек.

При ионизации атома (например в парах металла) эта энергия обращается в работу отрывания электрона, а в тех случаях, когда энергия излучения ($h\nu$) больше энергии ионизации атома (W_i), избыток энергии излучения превращается в кинетическую энергию оторванного электрона, который после ионизации получает тем большую скорость, чем больше частота вызвавшего ионизацию света. Электроны внутри твердого металла, как мы знаем, не связаны с атомом и находятся в свободном состоянии, поэтому проникающее в металл излучение частично поглощается свободными электронами, обращаясь в их кинетическую энергию. Здесь уместно отметить два обстоятельства: во-первых, поглощение света происходит в тонком слое у поверхности металла, во-вторых, большая часть энергии поглощаемого металлом света затрачивается на колебание положительных ионов и нераспавшихся на электрон и ион атомов. При этом увеличивается интенсивность теплового движения, т. е. повышается температура металла. Часть энергии, поглощаемая свободными электронами, не превышает для электромагнитных колебаний оптической частоты (видимый свет и ультрафиолетовые лучи) нескольких десятых процента от общего количества поглощенной металлом энергии. Этим и объясняется весьма малая величина фотоэлектронных токов. Свободный электрон внутри металла, освещенный светом частоты ν может поглотить энергию лишь в виде определенной порции $\Delta W = h\nu$. За счет поглощенной энергии его живая сила и скорость увеличиваются, и при достаточно большой порции (кванте) энергии $h\nu$, т. е. при достаточно высокой частоте света, приобретенная им скорость оказывается достаточной для того, чтобы электрон проскочил поверхностный слой металла, совершив работу вырывания, равную, как известно, $\Pi = \frac{Pe}{300}$, где P — поверхностный скачок потен-

циала, выраженный в вольтах, а e — заряд электрона. Если частота света такова, что квант энергии $h\nu$ меньше работы вырывания Π , то электрон, даже поглотив эту порцию энергии, все равно не сможет выскочить из металла. При $h\nu = \Pi$ электрон покинет поверхность металла со скоростью равной нулю, т. е. лишь для $h\nu > \Pi$ электроны будут вылетать из металла под действием освещения. Если поглощенная порция энергии превышает работу вырывания, то часть энергии излучения будет затрачена на работу выхода, остальное же количество останется в виде кинетической энергии электрона по выходе его из металла; поэтому мы можем написать соотношение

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h\nu - \Pi, \quad (17b)$$

где v — скорость электрона по выходе из металла. Это соотношение, названное формулой Эйнштейна, подтвердилось с чрезвычайно большой степенью точности для различных металлов при разных частотах падающего света.

Здесь нужно лишь добавить, что наши соображения относились к электронам, находящимся в самом наружном слое металла. Тем электронам, которые поглощают порцию энергии света, находясь на некоторой глубине в металле, нужно кроме работы выхода совершить некоторую работу для продвижения из глубины металла на поверхность. Хотя эта величина и много меньше чем Π , но все же, благодаря тому, что электроны вырываются не только с самой поверхности металла, но и из близлежащих более глубоких атомных слоев, не все электроны по выходе из металла будут иметь одинаковую кинетическую энергию. Соотношение Эйнштейна справедливо лишь для тех, которые вырваны из поверхностного слоя и для которых кинетическая энергия и скорость v имеют максимальное значение, поэтому в формуле (17-б) написано не просто v , а $v_{\max}$. Кроме того при всех предыдущих рассуждениях не принято во внимание тепловое движение электронов, которое может способствовать их выходу из металла, так что, строго говоря, соотношение (17-б) справедливо лишь при абсолютном нуле, когда нет теплового движения. Вместе с тем при комнатных температурах тепловые скорости настолько незначительны, что практически ими можно совершенно пренебречь, что и доказывается блестящим согласием формулы Эйнштейна с опытом.

10. Граничная частота.

Мы видели, что свет частоты, меньшей чем ν_0 , определяемой соотношением

$$h\nu_0 = \Pi, \quad (17c)$$

которая носит название граничной частоты, не может вызвать вырывания электронов. В приводимой ниже таблице 6 даны для различных металлов значения предельной длины волны λ_0 , связанной с граничной частотой соотношением

$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$, где c — скорость света. При значениях λ больших λ_0 испускания электронов нет.

Интенсивность или сила освещения играет в явлении фотоэффекта следующую роль: число вырванных электронов пропорционально интенсивности освещения, тогда как их скорость по выходе из металла определяется всецело частотой (или длиной волны) падающего света. Вместе с тем, если длина волны света больше (частота меньше) предельной, определяемой из соотношения (17-с), то, какова бы ни была интенсивность освещения, фотоэффект не будет иметь места, так как энергия электрона задается исключительно величиной кванта (т. е. частотой) и лишь число электронов данной энергии пропорционально интенсивности света. Легко видеть, что элементы, поставленные в ряд по убывающим значениям, у предельной длины волны будут представлять собой ряд Вольта, так как предельная длина волны обратно пропорциональна работе вырывания электрона и следовательно и граничному скачку потенциала.

В таблице 6 против названия элемента, стоит предельная длина волны, выраженная в *ангстремах*. Один ангстрем ($\text{\AA}$) равен 1×10^{-8} см. Для большей наглядности можно указать, что пределы видимого спектра лежат между $7800 \text{ \AA}$ (граница с инфракрасным излучением) и $3500 \text{ \AA}$ (граница ультрафиолетового излучения). Все приведенные значения относятся к очень тщательно

очищенным поверхностям металлов, так как при фотоэффекте, равно как и в случае испускания раскаленных металлов, огромное значение имеют все факторы, которые отражаются на поверхностном скачке потенциала (как-то: загрязнение поверхности, поглощение газа и т. п.).

Таблица 6.

Название элемента	Предельная длина волны в Å (1×10^{-8} см)	Название элемента	Предельная длина волны в Å (1×10^{-8} см)
Калий (K)	10 000	Железо (Fe)	∞ 2870 ¹
Натрий (Na)	5830 — 6800 ¹	Медь (Cu)	2750 — 3000 ¹
Алюминий (Al)	8596 — 4770 ¹	Платина (Pt)	2 800
Свинец (Pb)	3 115	Оксид кальция (CaO) .	2000 — 2688
Ртуть (Hg)	2 600		

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. ПРОХОЖДЕНИЕ ТОКА ЧЕРЕЗ ГАЗ.

1. Механизм прохождения тока через газ.

При небольших напряжениях поля газы в естественных условиях являются наилучшими из всех известных диэлектриков. Перенос зарядов здесь совершается ионами и электронами, возникающими в результате воздействия на газомые молекулы того или иного ионизатора. В естественных условиях ионизаторами служат γ -лучи радиоактивных элементов земной коры, электродов и сосуда, космическая проникающая радиация и ряд других излучений. Все эти ионизаторы однако настолько слабы, что сила тока, идущего через газ, лежит на пределе измерения ($< 10^{-10}$ А), если только поле не слишком сильно.

Проводимость газа может быть сильно повышена в случае воздействия более мощных, чем перечисленные выше, ионизаторов. Очень сильное нагревание (выше 1500°), освещение электродов ультрафиолетовыми лучами, действие препаратов радиоактивных веществ и рентгеновых лучей вызывают токи через газ и при малых давлениях, в сотни миллионов раз большие нормальных.

Закон Ома для газа выполняется только для очень малых значений поля. При больших градиентах поля сила тока остается постоянной („ток насыщения“), и наконец при некотором определенном напряжении (значение которого зависит от рода газа и давления) ток начинает резко возрастать; при больших давлениях вскоре после этого наступает пробой (рис. 7).

Характер зависимости I от V допускает очень простое физическое толкование. В поле с малым градиентом (часть *ab*) скорость ионов мала, они испытывают большое число столкновений, рекомбинируют (ионы противоположных знаков соединяются в молекулу) и число их, достигающее электродов, меньше образуемого ионизатором. По мере увеличения силы поля и скорости движения ионов рекомбинация играет все меньшую и меньшую роль и в конце концов (часть *bc*) все ионы, возникшие в газе, попадают на электроды. По величине

¹ Два числа означают пределы, между которыми заключена граничная частота.

² Знак ∞ означает не вполне достоверные измерения.

тока в этой части характеристики, по „току насыщения“, легко вычислить число ионов, возникающее в единице объема газа в секунду. Пусть n это число, v объем газа, $i_{\max}$ ток насыщения. Заряд, который получают электрод за единицу времени, равен числу достигших его ионов, умноженному на заряд каждого из них:

$$q = nev = i_{\max}$$

и таким образом;

$$n = \frac{i_{\max}}{ev}$$

Часть cd есть область ионизации. При градиентах потенциала больших V насыщения скорость движения электронов становится настолько большой, что на своем пути между электродами они способны отщеплять новые электроны от газовых молекул; число носителей электричества в газе сильно возрастает, проводимость его определяется уже не одним только внешним ионизатором. В том случае, если начальные ионы возникают на поверхности электрода (случай фотоэффекта), ток представляется соотношением:

$$I = i_{\max} e^{ad}. \quad (17d)$$

В случае объемного распределения первоначальных ионов формула (17d) переходит в

$$I = i_{\max} \frac{e^{ad} - 1}{ad}.$$

В обеих формулах d — расстояние между электродами, $i_{\max}$ — ток насыщения, a — некоторая величина, зависящая от градиента поля x и давления газа p ; a имеет вполне определенное физическое содержание и представляет число ионов в газе, созданное электроном на сантиметре пути. Зависимость a от p и x представлена на рис. 8, заимствованном у Тоунсенда (Townsend).

Рис. 8. Зависимость величины $\frac{a}{p}$ от $\frac{x}{p}$, где x — градиент поля и p — давление газа (случай объемного распределения первоначальных ионов).

В точке d характеристики рис. 7 в газе возникает ионизация положительными ионами. Для начального поверхностного распределения ионов сила тока выражается здесь соотношением:

$$I = i_{\max} \frac{(a - \beta)s(a - \beta)d}{a - \beta s(a - \beta)d}, \quad (18)$$

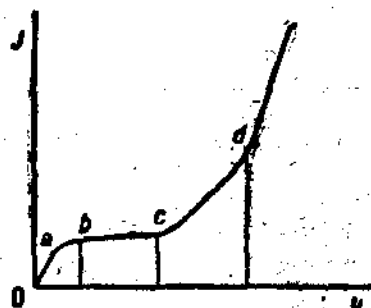


Рис. 7. Зависимость силы тока от напряжения при прохождении тока через газ.

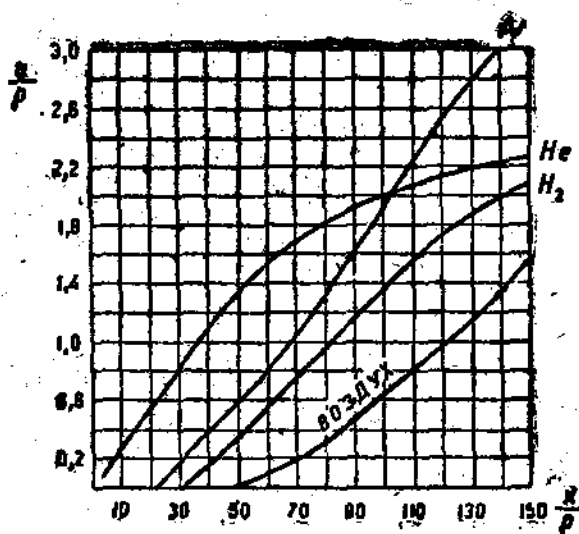


Рис. 8. Зависимость величины $\frac{a}{p}$ от $\frac{x}{p}$, где x — градиент поля и p — давление газа (случай объемного распределения первоначальных ионов).

В точке d характеристики рис. 7 в газе возникает ионизация положительными ионами. Для начального поверхностного распределения ионов сила тока выражается здесь соотношением:

$$I = i_{\max} \frac{(a - \beta)s(a - \beta)d}{a - \beta s(a - \beta)d}, \quad (18)$$

где все обозначения те же, что и выше; β — новый коэффициент, зависящий от p и x (рис. 9) и равный числу новых ионов, создаваемых одним положительным ионом на сантиметре пути.³

Формула (18) позволяет вычислить пробивное напряжение газа в зависимости от давления и расстояния между электродами, так как функциональная зависимость α и β от p и x хорошо изучена. Пробой по Тоунсенду характеризуется бесконечно большим значением силы тока, и пробивной градиент газа может быть определен таким образом из условия:

$$\alpha - \beta e^{(\alpha - \beta)x} = 0 \quad (19)$$

Согласие опытных данных с формулой (19) в области не слишком высоких давлений получается очень хорошее; при атмосферном давлении и выше наблюдаются отступления, обсуждение которых однако выходит за пределы нашей темы.

Разряд при больших давлениях в том виде, как это было описано выше, с непосредственным переходом от малых токов к большому наблюдается лишь в случае достаточно однородного электрического поля (при плоских электродах или шарах большого диаметра). В тех случаях, когда поле не однородно (в случае цилиндрического воздушного конденсатора или, например, в случае двух остриевых разрядников), искровому разряду предшествует явление так называемой „короны“. На электродах в местах с большим градиентом поля появляется — в зависимости от ряда условий —

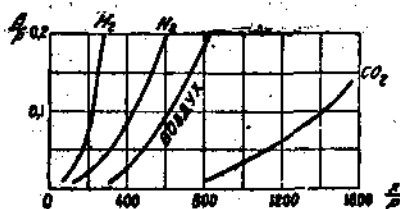


Рис. 9. Зависимость величины β от $\frac{x}{p}$, где x — градиент поля и p — давление газа (случай поверхностного распределения первоначальных ионов).

равномерное свечение или ряд светящихся нитей, исходящих из разных точек поверхности. Появление свечения на электродах сопровождается заметным усилением тока, разряд по мере повышения напряжения более или менее плавно переходит в искру.

2. Искра.

Опыт показывает, что искровой разряд не является процессом стационарным. Искра в газе наблюдается лишь в тех случаях, когда мощность источника не очень высока; при пробое напряжение на электродах резко падает, ионизация прекращается, напряжение постепенно возрастает до нового искрового разряда и т. д.

В случае мощных источников разряд переходит в широкое свечение со слабо очерченными краями; эта форма уже является стационарной.

Изложенная выше теория Тоунсенда ничего не говорит о явлениях за пробоем. Уравнение (19) определяет только критическое напряжение начала пробойного процесса, но оно не позволяет ничего сказать о его росте и форме, в которой бы он мог существовать за пределом этого напряжения.

3. Самостоятельный разряд.

Бесконечно большая величина силы тока может считаться только математически условием пробоя и признаком перехода одного режима в другой,

но физически очевидно, что в пространстве между электродами при пробое газа возникнут условия, в результате которых установится вполне определенная конечная сила тока, установится новый стационарный режим. Эта область прохождения тока через газ получила название области самостоятельного разряда. Существенное отличие протекающих здесь явлений от явлений в еще не пробитом газе лежит в строении поля между электродами. В то время как до пробоя оно определяется извне формой электродов и расстоянием между ними и в общем однородно, после пробоя оно задается самим разрядом, объемными зарядами, возникающими в результате движения громадных масс ионов и электронов, продуктов бурной ионизации, и как правило очень не однородно.

4. Тлеющий разряд.

Благодаря чисто экспериментальным трудностям поле самостоятельного разряда при атмосферном давлении не изучено достаточно подробно, но зато оно хорошо известно в этом случае для низких давлений, для так называемого „тлеющего“ разряда (рис. 10). Легко объяснить строение поля в тлеющем разряде, рассматривая движение ионных масс в трубке.

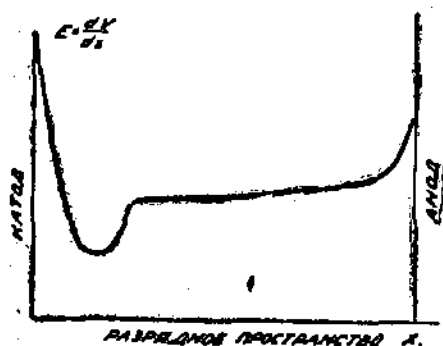


Рис. 10. Схематическое изображение поля тлеющего разряда.

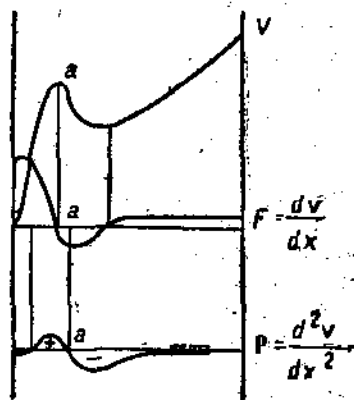


Рис. 11. Схематическое изображение величин V , F и P для тлеющего разряда.

Направляющиеся от катода электроны на некотором расстоянии от него в точке a (рис. 11) производят ионизацию; возникающие в результате ионизации электроны за точкой a образуют отрицательный, ионы, двигаясь к катоду, создают здесь положительный объемный заряд. По уравнению Пуассона:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -4\pi\rho, \quad (20)$$

где ρ — объемный заряд.

Путем графического интегрирования можно построить зависимость $\frac{dV}{dx}$ от x и V от x (средняя и верхняя кривые рис. 11); построение и опыт дают один и тот же характер распределения.

5. Катодное падение.

В процессе самостоятельного разряда вблизи катода возникает скачок потенциала, вызванный положительным объемным зарядом. Тщательные и многочисленные исследования показали, что он является своего рода регулятором разряда, определяющим возможность его стационарного состояния. Было выяснено, что положительные ионы, разгоняясь в катодном падении, при ударе о катод вырывают из него электроны. В установившемся процессе за единицу времени срывается с катода n электронов; катодное падение удовлетворяет тому условию, что разогнавшиеся в нем n положительных ионов, образованных ионизацией, срывают столько же n , т. е. новых электронов, обеспечивающих дальнейший ход ионизационного процесса.

6. Анодное падение.

При построении картины поля до сих пор еще не были учтены явления на аноде.

Направляющиеся сюда электроны образуют у электрода отрицательный объемный заряд и создают анодное падение потенциала. Нетрудно убедиться в том, что последнее падение, как и катодное, будет иметь вполне определенное значение. Падение у анода растет по включении напряжения до тех пор, пока ионизация электронами у поверхности анода не даст достаточного количества положительных ионов для компенсации дальнейшего роста отрицательного объемного заряда; у анода установится равновесие между теми и другими носителями электричества, и нетрудно убедиться, что оно будет устойчивым. При всяких количественных подсчетах нужно иметь в виду, что благодаря большей массе, а значит, и малой податливости, один ион компенсирует весьма большое число электронов; в ртутных парах например для компенсации заряда 400 электронов достаточно располагать всего одним ионом.

Для понимания процессов разряда, так же как и принципов выпрямления в газовых трубках, наиболее существенно ознакомиться с закономерностями катодных и анодных падений потенциала.

7. Нормальное катодное падение.

Уже давно было известно, что величина катодного падения потенциала не зависит от силы разрядного тока и давления газа в трубке до тех пор, пока вся поверхность катода не покроется свечением. Величина этого падения получила название нормального катодного падения потенциала; она зависит только от материала электрода и природы газа. Определению нормального падения потенциала посвящено очень много работ, но результаты исследований не могут быть признаны в большинстве случаев достоверными; причина этого лежит в том, что наличие самых незначительных примесей как на поверхности катода, так и в газе очень сильно меняет величину падения, и нужно сказать, что на эту сторону вопроса редко обращалось надлежащее внимание.

В таблице 7 сведены данные различных исследователей для величины нормального падения потенциала в зависимости от материала электрода и рода газа. Истолкование результатов таблицы 7 встречает много затруднений; при современном положении вопроса нельзя еще выделить в общем падении потенциала части, определяемой газом и металлом электрода; решение задачи во многих случаях осложняется еще тем, что металл реагирует с газом (образуя химиче-

ские соединения, абсорбируя газ), что вносит пока совершенно неучитываемые изменения. Но, если нельзя говорить о количественных закономерностях, все же можно установить ряд общих правил, характеризующих металл катода и газ при разряде.

Первое из этих правил связывает величину падения потенциала со способностью металла отдавать свои электроны. Для устойчивости разряда необходимо налучение определенного числа электронов из бомбардируемого ионами катода; скорость и энергия ионов растет вместе с увеличением катодного падения, и можно поэтому ожидать, что при прочих равных условиях падение потенциала при разряде будет меньше у металла, способного легко терять электроны.

Эта способность может быть определена из термо-ионных и фото-электрических явлений. В первом случае она характеризуется величиной b в уравнении

$$i = aT^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{b}{T}} \quad (21)$$

и тем больше, чем меньше b ; во втором она определяется граничной длиной света, возбуждающей фотоэффект и тем больше, чем дальше в сторону длинных волн лежит эта граница.

Таблица 7.

Нормальное катодное падение в вольтах.

Газ Металл	Воздух	O ₂	H ₂	N ₂	He	Ne	Ar	Kr	X	Hg
Натрий	—	—	185	178	80	75	—	—	—	—
Калий	—	—	94	170	59	68	64	—	—	—
Медь	252	—	214	208	177	—	—	—	—	—
Серебро	279	—	216	233	162	—	131	—	—	—
Магний	224	310	153	188	125	94	119	—	—	—
Кальций	—	—	—	157	86	—	93	—	—	—
Ртуть	—	—	270	226	142,5	—	—	—	—	340
Алюминий	229	311	171	179	141	120	100	—	—	—
Молибден	—	—	—	—	—	125	—	—	—	—
Вольфрам	—	—	—	—	—	115	—	—	—	—
Железо	269	343	198	215	161	—	131	215	306	369
Никкель	226	—	211	197	—	—	131	—	—	—
Платина	277	364	276	216	160	152	131	—	—	340

Рис. 12 и 13 подтверждают высказанные предположения о закономерностях катодного падения. Как видно из рис. 12, нормальное катодное падение потенциала приблизительно пропорционально величине b (на рис. 12 она обозначена буквой ϕ):

$$V_{\text{кор.}} = Cb,$$

C зависит только от рода газа.

Как показывает рис. 13 катодное падение потенциала тем больше, чем ближе к синей части спектра лежит граничная длина волны света.

Второе правило связывает величину падения потенциала со средством и электроны газа, заполняющего трубку; это хорошо видно из сравнения нашей таблицы с таблицей для средств электронов.

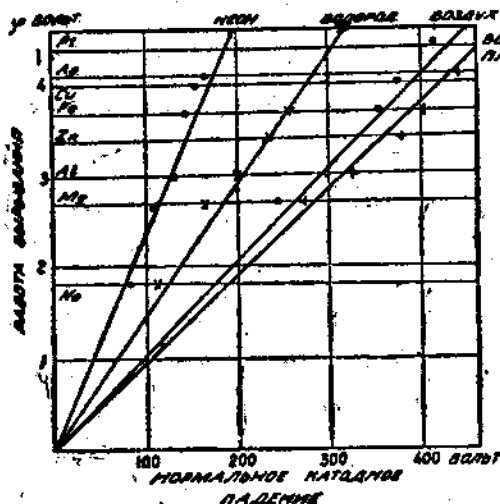


Рис. 12. Зависимость работы вырывания электрона от величины нормального катодного падения.

Воздействуя на разряд извне, можно легко свести катодное падение к очень малым значениям, для этого необходимо тем или иным способом усилить эмиссию электронов из катода. Такое усиление достигается освещением катода ультрафиолетовыми лучами с длиной волны, дающей фотоэффект с металла, нагреванием электрода от постороннего источника тока, вспомогательным устройством в трубке, дающим возможность направить вспомогательный пучок электронов к катоду и т. д.

Наиболее простой и вместе с тем действительный способ нагревания катода позволяет свести падение потенциала всего к нескольким вольтам, разряд при этом легко принимает особый характер, между электродами загорается дуга.

К замечательным особенностям разряда в той области, где катодное падение потенциала нормально, т. е. при условии, что свечение не покрывает всей поверхности электрода, относится постоянство плотности тока на катоде. Плотность тока в этой области разряда, так называемая „нормальная плотность тока“, так же как и нормальное падение потенциала, зависит от материала катода и природы газа, и вместе с тем сильно меняется с давлением. Особую сложность в последнюю зависимость вносит влияние формы электрода, которая вообще сильно сказывается на нормальной плотности тока. На выпуклых поверхностях плотность тока растет с ростом кривизны, на вогнутых поверхностях она зна-

Представляют большой как теоретический, так и практический интерес значения катодных падений потенциала в смесях газов.

В случае газов, не реагирующих друг с другом, здесь как правило выполняется принцип аддитивности. Заметим, что газы, химически индифферентные при обычных условиях, могут соединяться в условиях разряда, когда часть молекул ионизована и возбуждена. В условиях разряда возможно окисление даже и благородных газов (He и Ne). В случае реагирующих газовых смесей падение потенциала лежит обычно выше и только в очень редких случаях немного ниже тех значений, которые дает принцип аддитивности.

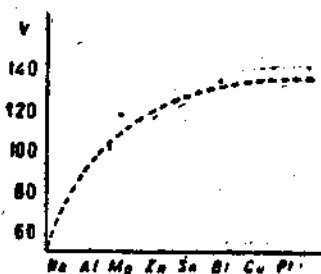


Рис. 13. Нормальное катодное падение потенциала для различных металлов

чительно выше чем на плоских и может больше чем в десятки раз превосходить последнюю. Важно отметить, что форма электрода сказывается не только на абсолютных значениях тока, но и на виде функциональной зависимости плотности тока $i_{\text{нор}}$ от давления газа p . На плоском катоде $i_{\text{нор}}$ пропорционально p^2 , на цилиндре, радиус которого весьма мал, — пропорционально первой степени давления; в общем же случае можно написать, что:

$$i_{\text{нор}} = ap^m,$$

причем значение m определяется формой электрода, а значение a материалом его и природой газа. Значение константы a в газах H_2 , N_2 , и Ne для различных металлов приведено в таблице 8.

ТАБЛИЦА 8.

Газ \ Металл	Al	Zn	Cu	Fe	Pt
H_2	0,140	0,120	0,125	0,140	0,125
N_2	0,225	0,240	0,350	0,325	0,290
Ne	0,008	0,006	0,024	0,026	0,011

8. Аномальное катодное падение.

При возрастании силы тока в трубке с того момента, когда катод по всей поверхности покрывается свечением, катодное падение потенциала начинает расти; здесь говорят об аномальном падении. Аномальное падение зависит от давления и при равных плотностях тока тем больше, чем ниже последнее. Этим обстоятельством широко пользуются при устройстве вентиляционных трубок с тлеющим разрядом.

Зависимость $v_{\text{аном}}$ от силы тока представляется обычно эмпирическими формулами:

$$v_{\text{аном}} = v_{\text{нор}} + \frac{k}{p} (i - i_{\text{нор}})^{\frac{1}{2}},$$

$$v_{\text{аном}} = v_{\text{нор}} + \frac{h\sqrt{i}}{p},$$

здесь $v_{\text{нор}}$ и $i_{\text{нор}}$ — нормальные катодное падение и плотность тока, $v_{\text{аном}}$ и i — действительные падение потенциала на катоде и плотность тока, k — численная постоянная.

Рис. 14 дает численные значения аномального падения в зависимости от давления и плотности тока для платинового катода.

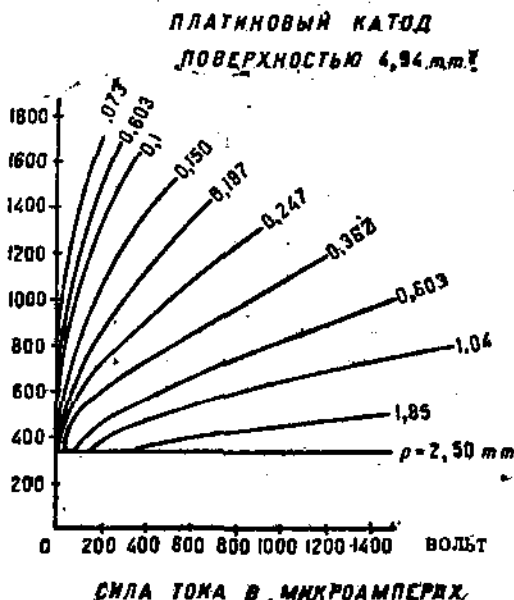


Рис. 14. Аномальное катодное падение потенциала для платинового катода в зависимости от давления газа при различных силах тока.

Ни одной из приведенных формул нельзя дать особого предпочтения, ни одна из них не может быть оправдана теоретическими соображениями.

Некоторые исследователи приходят за последнее время к зависимости $v_{\text{анод}}$ от i вида:

$$v_{\text{анод}} = a \sqrt{i},$$

но и это соотношение сейчас еще не может считаться общепризнанным.

9. Величины анодного падения.

Падение потенциала у анода значительно меньше катодного; так же как и в том случае, здесь можно различать нормальные и аномальные падения; при малых разрядных силах тока плотность тока на электроде постоянна.

В таблице 9 представлены результаты Скиннера (Skipner), позволяющие судить об абсолютных величинах падения.

ТАБЛИЦА 9.

Газ	P в мм	Pt	Cu	Fe	Ni
H ₂ . . .	1,73	18,0	18,9	22,1	19,9
	1,70	17,3	20,0	18,5	19,3
N ₂ . . .	1,39	18,8	19,7	19,7	20,3
	1,37	18,5	19,0	19,4	19,4
O ₂ . . .	1,20	22,2	23,2	23,8	23,5

Величина анодного падения потенциала зависит не только от силы тока, давления, природы газа и материала анода, но и формы его и расположения относительно катода. Нагревание анода не сказывается заметно на величине анодного падения, чего и следовало ожидать, если принять во внимание, что излучение положительных ионов ничтожно для металлов и вызывается обычно наличием загрязняющих поверхность электрода солей. Большая часть закономерностей, известных для анодного падения, может быть объединена следующим правилом: анодное падение уменьшается вместе с ростом „плотности возбуждения“, величины, которая характеризует явления возбуждения и ионизации молекул газа в условиях разряда.

На основании этого правила можно сказать, что анодное падение меньше для вогнутых форм электрода, чем для выпуклых. В первом случае излучение разряда концентрируется в объеме газа у анода, атомы здесь могут быть возбуждены светом, и ионизация их электронами облегчается. Понятие „плотности возбуждения“, как основного фактора, определяющего величину падения, оказалось весьма плодотворным в решении вопроса о зависимости этого падения от материала анода. Оказалось, что все влияние материала определяется только отражательной способностью металла, которая меняет „плотность возбуждения“ у анода. В результате этого предварительного возбуждения очень часто анодное падение потенциала даже меньше ионизационного потенциала газа.

Зависимость падения от давления газа вызывается в значительной степени изменением „плотности возбуждения“ с давлением. Возбужденные газовые молекулы диффундируют от анода в массу газа и в этом процессе рассеивают „возбуждение“ при столкновениях; чем выше давление, тем слабее диффузия, тем больше „плотность возбуждения“. В электроотрицательных газах и в случае электроотрицательных примесей, анодное падение всегда выше, чем в газах, молекулы которого обладают малым сродством к электрону; объемный заряд образуется в этом случае уже не только одними электронами, но и отрицательными ионами, а для компенсации последних малоподвижных носителей электричества нужно иметь больший положительный объемный заряд и большее падение потенциала.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

ДУГОВОЙ РАЗРЯД.

1. Общее описание явления.

Дуговой разряд, представляет собой частный случай разряда при наличии объемных зарядов, и в сущности имеет очень много общего с тлеющим. Вместе с тем в дуговом разряде или, короче, дуге появляется ряд явлений совершенно специфических и не встречающихся при других формах прохождения тока через газ. Наиболее существенной особенностью дугового разряда является особая роль явлений, имеющих место на катоде. В дальнейшем мы должны однако постоянно помнить ту тесную связь, которая существует между дуговым и тлеющим разрядами.

В предшествовавших главах мы говорили о том, что самостоятельный разряд может иметь место лишь в тех случаях, когда приложенная разность потенциалов превышает нормальное катодное падение. Для дугового разряда это соотношение не выполняется, благодаря ряду явлений, на которых мы подробно остановимся ниже. Можно привести несколько примеров, иллюстрирующих это положение. В частности, если мы присоединим к сети переменного тока напряжением в 110 вольт два прижатых друг к другу угольных цилиндра с включенным последовательно балластным сопротивлением, а затем осторожно начнем раздвигать уголи, то между ними появится ярко светящееся облачко газа, которое имеет хорошо известную форму дуги, концы углей разогреются до ярко-белого каления и через систему будет идти достаточно устойчивый ток, который, в зависимости от сечения углей, величины балластного сопротивления, может достигать нескольких сот (и более) ампер. Измерения разности потенциалов между угольными электродами покажут нам (опять-таки в зависимости от разных внешних условий), что напряжение, при котором горит дуга, т. е. происходит разряд, может не превышать 38 вольт. В случае дуги между металлическими электродами эта разность потенциалов падает до 20 вольт; наконец, наблюдая дугу между электродами из жидкой ртути в запаянном сосуде, который тщательно откачан или заполнен благородным газом при пониженном давлении (в этом случае дуговой разряд по внешнему виду очень похож на тлеющий), мы сможем при некоторых условиях иметь дугу при напряжениях, не превышающих десяти вольт. Все эти величины значительно меньше нормального катодного падения. В случае ртутной дуги мы можем наблюдать переход от обычного тлеющего разряда к дуговому. Измеряя силу тока и при возрастающей разности потенциалов на зажимах трубки, мы получим следующую

характеристику: в начале будет иметь место тлеющий разряд, причем той i будет сравнительно малым, а разность потенциалов e , в виду большого катодного падения, большой. При некоторой, зависящей от условий опыта, силе тока форма разряда внезапно меняется, сила тока увеличивается во много раз, а разность потенциалов падает и оказывается — при правильно подобранных условиях — значительно меньшей, нежели нормальное катодное падение.

2. Различные формы дугового разряда.

В описанных опытах наблюдается новое явление, не игравшее значительной роли при тлеющем разряде. Это явление заключается в интенсивном испарении электродов под влиянием разряда. Особенное значение имеет испарение электродов в дугах при пониженном давлении между электродами из легкоплавких металлов (ртуть, кадмий) или амальгам. В этих случаях дуговой разряд происходит главным образом за счет движения носителей электричества, происшедших от ионизации электродных паров. Вместе с тем, как мы увидим ниже, наличие этих паров вдоль всего пути дугового разряда не является существенным. Примером могут служить так называемые „длинные дуги“, которые последнее время, особенно в заграничной практике, получили большое техническое применение при производстве азотистых соединений из атмосферного азота. В этих дугах, достигающих длины в несколько метров,¹ испарение электродов хотя и имеет место, но сколько-нибудь значительное количество паров имеется лишь в непосредственной близости от электродов. То, что пары электродов играют относительно малую роль в случае длинных дуг, доказывается еще и тем обстоятельством, что характеристики этих дуг зависят в очень малой степени от материала электродов, определяясь в основном природой и давлением газа, в котором происходит разряд.

3. Дуги с холодным анодом.

Можно привести примеры дугового разряда, при котором испарение имеет место лишь на одном из электродов, причем другой электрод может оставаться совершенно холодным. Здесь однако следует отметить, что дуга может иметь место лишь в случае холодного анода и испаряющегося катода, а не наоборот. Примером могут служить неоновые лампы, имеющие, помимо лабораторных применений, большое техническое значение в области заграничной рекламной осветительной техники. В этих лампах разряд происходит в атмосфере неона между анодом из тугоплавкого металла (вольфрам, молибден и др.) и катодом из легко испаряющегося сплава, в состав которого входят щелочные металлы. Отметим, что спектральное исследование дуги указывает на то, что в случае дуг с горячим катодом и холодным анодом свечение в области, прилегающей к катоду, имеет спектр паров материала, из которого сделан электрод; в анодной области свечение в точности соответствует излучению атмосферы, в которой происходит разряд. Дуги с холодным анодом легко получаются между металлическими электродами при пониженном давлении, в самых различных газах. Их часто называют „тлеющими дугами“.

¹ Такого рода дуги можно получить в вертикальных трубках, внутри которых создается с помощью механического дутья газовый вихрь, коаксиальный с цилиндром служащий для стабилизации дугового разряда.

4. Дуги с неиспаряющимися электродами.

Из приведенных примеров напрашивается следствие, что необходимым условием для дугового разряда является испарение катода. Вместе с тем и это условие не является обязательным. Поучительным примером в этом отношении является дуга между вольфрамовыми электродами в атмосфере инертного или благородного газа. Такого рода дуги лежат в основе конструкции получивших за последнее время широкое распространение точечных ламп. Эти лампы представляют собой стеклянный баллон, заполненный азотом или каким-либо благородным газом под давлением в 100 мм. Разряд, несомненно имеющий характер дугового, происходит между небольшими шариками из вольфрама, помещенными на очень малом расстоянии друг от друга. Подсчет показывает, что давление паров вольфрама при горении дуги не превышает 10^{-3} — 10^{-4} от общего давления газа, что указывает на ничтожную роль, которую в данном случае играют пары катода в процессе разряда.

Вместе с тем, поддерживая один из электродов при пониженной температуре (например, сделав электроды разной величины), мы можем убедиться в том, что при холодном катоде разряд не происходит, хотя испарение катода в данном случае существенного значения не имеет.

Таким образом, резюмируя те сведения, которые мы приеали о различных формах дугового разряда, мы должны сказать, что ни наличие электродных паров на пути разряда, ни нагревание анода, ни даже испарение электродов не являются необходимыми и отличительными признаками дугового разряда. Необходимым и достаточным условием для горения дуги является достаточное разогревание катода. Какова именно должна быть температура катода и какова его роль в процессе разряда, мы выясним подробнее, когда коснемся теории явления, происходящих на катоде дуги.

5. Форма обычного дугового разряда.

Внешний вид самого разряда сильно зависит как от материала электродов природы и давления газа, в котором разряд происходит, так и от расстояния между электродами. Наиболее отчетливо можно видеть все части разряда в случае ртутной дуги при пониженном давлении. Характерно для всякой дуги явление, которое носит название светлого катодного пятна. Разряд как бы выходит из этого участка катода. Часть дуги, примыкающая к катоду, отличается от тлеющего разряда отсутствием катодного темного пространства. Из светлого пятна выходит светящийся пучок, соответствующий отрицательному свечению в случае тлеющего разряда. В остальном дуговой разряд ничем существенным не отличается от тлеющего, за исключением количественных различий и разных побочных факторов, зависящих от значительно большей плотности тока в случае дугового разряда.

В дуге мы, как и при тлеющем разряде, имеем Фарадеево темное пространство, которое следует за катодным пучком, и далее положительный столб, простирающийся в большинстве случаев до самого анода. В случае свободно горящих в воздухе дуг с большой плотностью тока внешний вид дуги изменяется, благодаря появлению пламенных языков, которые связаны с химическими реакциями, происходящими в дуге. Однако все эти детали свечения, равно как и имеющие место для угольных дуг: интенсивное разогревание анода, образование анодного кратера и т. п. явления, имеющие чрезвычайный интерес в

виду их светотехнических применений, мы оставляем при нашем рассмотрении в стороне постольку, поскольку они не определяют поведения дуги в электрическом отношении.

6. Светлое пятно.

Отличительной чертой дугового разряда, как мы видели выше, является появление на катоде так называемого светлого пятна. Мы увидим ниже, что и в отношении электрического режима оно играет исключительную роль. Наблюдения над светлым пятном представляют ряд затруднений особенно постольку, поскольку дело идет о металлических электродах. Светлое пятно быстро перемещается по поверхности металла, довольно беспорядочно перескакивая с места на место. Повидимому это объясняется бурным испарением электрода, нагреваемого до чрезвычайно высокой температуры на весьма малой поверхности. Например стробоскопические наблюдения светлого пятна на ртутном катоде показали, что за одну тысячную секунды светлое пятно успевает переместиться на расстояние равное нескольким его диаметрам.

В случае угольного электрода светлое катодное пятно оказывается значительно более устойчивым явлением. Размер пятна оказывается пропорциональным силе тока, причем плотность тока в светлом пятне равна приблизительно 470 ампер на 1 см^2 . В случае металлических электродов (как мы видели) намерение пятна не может быть выполнено с достаточной точностью. Можно лишь ориентировочно оценить величину плотности тока. Она оказывается приблизительно равной для ртутной дуги в вакууме $4000 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ и около $7000 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ для дуги между железными электродами в воздухе при атмосферном давлении

7. Температура дуги.

Измерения температуры в различных областях дугового разряда хотя и представляют большой интерес, но дают результаты, к которым нужно относиться с некоторой осторожностью благодаря тому, что методы измерения температур в области от 2500 до 5000° еще не достаточно разработаны и отличаются незначительной точностью. Результаты одной из серий измерений для угольной дуги приведены на рис. 15; приведенные данные относятся к дуге, горящей при атмосферном давлении при силе тока в 10 А и расстоянии между углями, равном 10 мм .

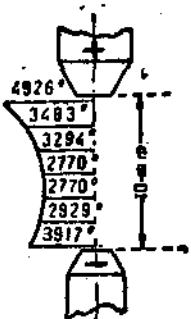


Рис. 15. Температуры в различных точках электрической дуги.

Изучение распределения температуры в дуге при различных условиях показывает, что температура в середине расстояния между углями, как и следовало ожидать, падает с увеличением расстояния. Что касается до электродов, то опыты показали, что температура катода очень сильно меняется в зависимости от условий опыта, как-то: силы тока, длины дуги, диаметра и материала углей и при удачном подборе этих условий может достигнуть температуры анода. Последняя в довольно значительных пределах ни от силы тока, ни от остальных перечисленных факторов не зависит, определяясь давлением газа, в

котором происходит горение дуги. Измерения температуры производились и для металлических дуг. Температура анода и здесь, как правило, выше чем катода, но она, как мы видели выше, не имеет большого значения, так как дуга может гореть и при холодном аноде.

8. Температура светлого пятна.

Поэтому мы ограничимся здесь результатами опытов, относящихся только к измерению температуры катода, вернее катодного светлого пятна.

Немногочисленные данные, имеющиеся в литературе по этому вопросу, сопоставлены в приводимой ниже таблице 10.

Таблица 10.

Металл	Магний	Никель	Железо	Цинк	Вольфрам	Алюминий
Температура светлого катодного пятна	2 350	2 365	2 430	3 000	3 000	3 450
Температура кипения металла	1 100	2 400	2 450	900	5 100	1 800

Хотя температуры кипения металлов, сопоставленные во второй строке таблицы 10, недостаточно достоверно известны (например для алюминия существуют измерения, дающие значения этой температуры в пределах от 1800 до 2300°), но все же можно отметить с несомненностью, что для нескольких металлов (Mg, Zn, Al) температура светлого пятна много выше температуры кипения.

Объяснением этого факта может служить то обстоятельство, что в случае этих металлов катод при высокой температуре покрывается тугоплавким окислом, который и имеет ту весьма высокую температуру, которую дает оптическое изучение светлого пятна. Это объяснение подтверждается тем, что измерения температуры светлого пятна в атмосфере инертного газа дают меньшие значения. Вместе с тем нужно все-таки допустить, что в некоторых случаях температура пятна много выше температуры кипения. Это имеет место например в случае ртутной дуги в атмосфере благородного газа. Правда более или менее достоверных измерений температуры светлого пятна на ртутном катоде не существует, но можно утверждать, что она много выше температуры кипения (которая при атмосферном давлении равна 356°), хотя возможность образования окислов в этом случае исключена.

9. Переход от тлеющего разряда к дуговому.

Приведенные нами сведения о поведении катода в дуговом разряде аналогичны поведению при тлеющем разряде в случае нормального катодного падения, отличаясь лишь с количественной стороны в связи с большими плотностями тока, имеющими место в дуге. Представляется весьма интересным проследить переход от тлеющего разряда к дуговому, если только он на самом деле имеется. Для этой цели достаточно ознакомиться с видом зависимости плотности тока на катоде от силы тока в дуге. Такая зависимость схематически представлена на рис. 16. Участок $A—B$ относится к тлеющему разряду при нормальном катодном падении. Здесь поверхность катода покрыта свечением не целиком; с увеличением силы тока возрастает часть поверхности, принимающая участие в разряде, благодаря чему плотность тока может оставаться постоянной. Начиная с точки B , катод покрыт полностью свечением, и плотность тока растёт пропорционально его силе. В части кривой,

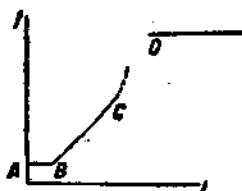


Рис. 16. Плотность тока на катоде в зависимости от силы тока при дуговом разряде.

начиная от точки *D*, относящейся уже к дуговому разряду, плотность тока опять оказывается постоянной, катод покрыт не полностью, так как активной в смысле разряда является практически лишь поверхность светлого пятна, растущая по мере увеличения силы тока.

Более подробное изучение переходной области (между *C* и *D*) сводится к исследованию условий тлеющего разряда при катоде, участвующем в последнем всей своей поверхностью.

Все это изучение можно вести лишь при достаточно низких давлениях, так как в противном случае возможен непосредственный переход от искрового разряда к дуге, минуя область тлеющего разряда. Кроме того наиболее простые соотношения можно ожидать в случае незначительного испарения катода. Этим условиям удовлетворяет разряд между вольфрамовыми электродами в атмосфере чистого азота при пониженном давлении. В этом случае действительно осуществляется постепенный переход от тлеющего разряда к дуговому. Характеристика этого разряда приведена на рис. 17,¹ на котором нанесена также и температура катода.

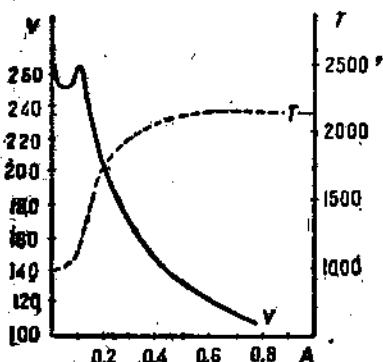


Рис. 17. Характеристика разряда переходного от тлеющего к дуговому.

В этом случае при тлеющем разряде в области аномального катодного падения весь катод служит основанием разряда. Однако при определенной плотности тока, соответствующей точке *C* рис. 16, свечение на катоде начинает стягиваться, образуя нечто вроде светящегося колпачка, прикрывающего только часть поверхности катода; с увеличением силы тока этот колпачок стягивается, чтобы в конце концов внезапно уменьшиться до размеров светлого пятна.

Все эти данные относятся к разряду при пониженном давлении (порядка 200 мм). Изучения переходных форм разряда при атмосферном давлении, имеющего большой практический интерес (в связи с образованием дуги в рубящих и переключающих приспособлениях), мы здесь касаться не будем, ограничившись указанием на то, что в случае дуги при атмосферном давлении могут иметь место (например при малом радиусе кривизны электродов) переходные формы стационарного тлеющего разряда, но чаще дуга завершает искровой, лавинный разряд.

В виду того, что в чистых условиях осуществляется непрерывный переход

¹ Небольшой минимум в начале кривой объясняется вторичными эффектами и значения для наших рассуждений не имеет.

от тлеющего разряда к дуговому, казалось бы неправильным говорить о дуге, как о какой-то вполне определенной и новой форме разряда. Если мы вместе с тем сознательно выделяем дуговые формы разряда, то это лишь потому, что все явления на катоде в случае дугового разряда очень скоро приходят к какому-то динамическому равновесию, выражающемуся в том, что весьма характерная для разряда величина — катодное падение — остается постоянной.

10. Катодное и анодное падения.

Измерение распределения потенциала в дуге представляет значительные трудности, в частности благодаря высоким температурам, относительно малым расстояниям между электродами и т. п. Даже в тех случаях, когда размещение вондров на пути разряда (например для ртутной дуги) не представляет существенных затруднений, все же по целому ряду соображений к их показаниям нужно подходить с большой осторожностью. Поэтому данные, относящиеся к распределению потенциала, часто основанные на косвенных заключениях, не могут считаться вполне достоверными. Наиболее полно с этой точки зрения изучен дуговой разряд между ртутными электродами. Резюмируя данные опыта, относящиеся к этому типу разряда, можно сказать, что в случаях небольших расстояний между электродами, когда анод как бы омывается отрицательным свечением, почти все падение потенциала происходит в очень тонком слое около катода (толщина этого слоя может быть приблизительно оценена в несколько тысячных миллиметра). Падение потенциала в отрицательном свечении очень мало, анодное падение в данном случае также не превышает малых долей вольта. Величина катодного падения в дуге может быть оценена приблизительно в 10 вольт,¹ и оно почти равно потенциалу зажигания. Для других металлов катодное падение лежит также вблизи 10 вольт и, что наиболее важно, остается, как и для ртутного катода, в довольно широких пределах сил тока постоянным, причем меняется лишь анодное падение. В случае угольного катода катодное падение как будто довольно сильно зависит от силы тока. На объяснении этого явления мы здесь не будем останавливаться в виду того, что наибольшее значение имеет для нас ртутная дуга, как находящая себе наибольшее применение в деле выпрямления.

Катодное падение практически не зависит и от расстояния между электродами. Значительно сложнее обстоит дело с анодным падением. Оно, как показывают результаты многочисленных измерений распределения потенциала у анода дуг с большим расстоянием между электродами,² зависит не только от силы тока, расстояния между электродами и давления газа, но и от формы и даже вещества анода. В этом отношении анодное падение в дуге ничем существенным не отличается от падения в случае тлеющего разряда. Несколько особыми свойствами обладают сильно нагретые под действием разряда аноды, на которых происходит бурное испарение вещества, однако все эти явления имеют существенное значение лишь для светотехнических применений дуги, и поэтому мы не будем вдаваться в их рассмотрение.

11. Характеристика дуги. Формула Айртон.

Рассмотрим сперва характеристику дуги для простейшего случая, когда разряд происходит под действием постоянной приложенной разности потен-

¹ По более старым данным — 5,3 вольта.

² Когда анод уже не находится в области отрицательного свечения

циалов. Наши соображения относятся к моменту времени, достаточно удаленному от зажигания дуги (статическая характеристика). Впервые была исследована с этой точки зрения дуга между однородными угольными электродами, причем характеристику, т. е. связь между разностью потенциалов на зажимах и силой тока, оказалось возможным выразить в виде следующего соотношения (которое носит название формулы Айртон):

$$V = a + bl + \frac{c + dl}{i}, \quad (22)$$

где i — сила тока (в амперах), l — длина дуги (в мм), измеренная между острием катода и плоскостью края анодного кратера, a , b , c и d — постоянные. Это соотношение, несмотря на свое удобство и простоту, не представляет строгой формулировки какой-нибудь физической закономерности, а является лишь удобной интерполяционной формулой. Величины констант a , b , c , и d зависят как от сорта угля, состава и давления газа, так и от диаметра углей (теплопроводность). Порядок величины этих констант можно видеть в приводимом примере, относящемся к однородным углям диаметра 10 мм, в воздухе при атмосферном давлении:

$$V = 38,98 + 2,07 l + \frac{11,66 + 10,54 l}{i}.$$

Из соотношения (22) явствует, что характеристикой дуги является гипербола с асимптотами $V = a + bl$ и $i = 0$; мощность, затрачиваемая в дуге, равна:

$$W = Vi = (a + bl)i + c + dl = a'i + b',$$

т. е. зависимость мощности от тока выражается прямой. Константу a можно истолковать как минимальное напряжение, при котором может гореть дуга в наимыгоднейших условиях ($d = 0$; $i = \infty$). Характеристики металлических дуг тоже в большинстве случаев могут быть представлены формулой Айртон. В этих случаях (особенно при большой длине дуги) константы определяются почти исключительно свойствами газовой среды. Константы для некоторых металлов сопоставлены в таблице 11, данные которой относятся к воздуху при атмосферном давлении.

ТАБЛИЦА 11.

Материал электродов	a	b	c	d
Платина	24,3	4,8	—	20,3
Медь	21,4	3,0	10,7	15,2
Железо	15,5	2,5	9,4	10,0

12. Характеристика закрытых дуг.

Формула Айртон в большинстве случаев совершенно непригодна для описания характеристики „закрытых дуг“, т. е. дуг, горящих в замкнутом пространстве. Типичным примером такой дуги является пустотная ртутная дуга.

В таких условиях мощность, выделяемая в дуге, определяет давление электродных паров, что в свою очередь отражается на распределении потенциала в положительном столбе и таким образом изменяет характеристику. В результате этих сложных взаимодействующих факторов типичной характеристикой закрытой дуги оказывается U-образная кривая. Форма ее однако в каждом отдельном случае зависит от целого ряда условий и в первую очередь от условий охлаждения трубки. Примером могут служить характеристики, приведенные на рис. 18, которые относятся к одной и той же ртутной дуговой лампе, но к разным условиям работы, причем кривая II относится к нормальному, кривая I — к пониженному, а III — к повышенному теплоотводу. Формула Айртон оказывается непригодной даже для однородных угольных электродов в условиях больших токов. При значительной плотности тока

дуговой разряд принимает несколько иную форму так называемой „шипящей дуги“; этот переход отражается в характеристике внезапным падением напряжения на зажимах дуги приблизительно на 10 вольт и сопровождается изменением формы разряда около анода (появление анодного ореола, сужение анодного кратера и т. д.). Подобные явления можно наблюдать и в случае металлических электродов, в частности и для точечной дуговой лампы (вольфрамовые электроды). Область „спокойного“ горения дуги отличается от области „шипящей“ дуги различным характером испарения материала анода. Более подробно физическая картина этого явления не выяснена.

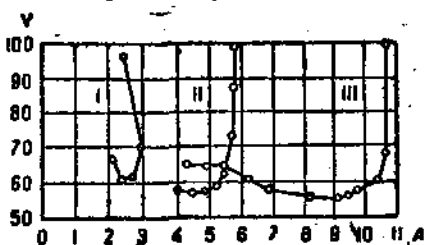


Рис. 18. Характеристики ртутной закрытой дуги.

13. Встречная электродвижущая сила в дуге.

До сих пор мы рассматривали характеристику дуги вполне формально, выражая через силу тока полное падение потенциала, не заботясь о том, каково распределение потенциала внутри дуги. Несколько дальше, подведя теоретический фундамент под все изложенные факты, касающиеся дугового разряда, мы разберем подробнее, как именно разность потенциалов на зажимах дуги распадается на катодное и анодное падения и падение потенциала в положительной столбе. Здесь мы остановимся еще на одном способе описания электрического режима дуги, который в некоторых случаях оказывается более наглядным. Можно (пока опять так же вполне формально) выразить разность потенциалов на зажимах дуги в виде:

$$V = ir + E, \quad (23)$$

приписав дуге некоторое омическое сопротивление r и внутреннюю электродвижущую силу E . Такое разложение пока не является однозначным. Однако величину r можно измерить отдельно, накладывая переменное напряжение очень небольшой амплитуды на постоянную разность потенциалов, под действием которой горит дуга (метод, подобный применяемому для определения сопротивления электролитов), сравнивая измеренное таким образом сопротивление, которое может быть вычислено из соотношения:

$$r = \frac{\Delta V}{\Delta i},$$

где ΔV — амплитудное значение приложенного малого переменного напряжения, а ΔI — амплитуда переменной составляющей тока. Сравнив полученное r со значением R , вычисленным из измерения тока и приложенной постоянной разности потенциалов:

$$R = \frac{V}{I},$$

можно выяснить, имеется ли встречная электродвижущая сила и какова она по величине, с помощью соотношения:

$$E = V - Ir.$$

Дальнейшее подтверждение существования встречной электродвижущей силы можно найти в измерениях мощности, так как мощность, затрачиваемая в дуге, равна:

$$W = VI = I^2 r + IE,$$

причем первый член, как квадратичный, не зависит от направления тока, а второй при изменении направления тока меняет свой знак. Поэтому, накладывая переменную разность потенциалов малой амплитуды на постоянную, под действием которой горит дуга, можно разделить „обратимую“ часть энергии от „необратимой“ и оценить величину встречной электродвижущей силы.

Кроме того относительно пространственного расположения этой внутренней электродвижущей силы (отчасти следовательно и относительно распределения потенциала вдоль разряда) можно сделать некоторые заключения из измерений величины r при различном расстоянии между электродами. Для пояснения всего сказанного можно привести численный пример: для дуги между однородными угольными электродами длиной 6 мм измерения дают силу тока $I = 9,9$ А, при напряжении на зажимах 63,6 В. Наложение переменного напряжения позволяет определить r , оказывающееся равным 5,2 Ω , откуда $E = V - Ir = 12,1$ В. Так

как r оказывается меньшим нежели $R = \frac{V}{I}$, встречная электродвижущая сила направлена в сторону, противоположную приложенной электродвижущей силе. Измерения при других силах тока показывают, что с увеличением I величина E немного, а r сильно падает. Измерения распределения потенциала с помощью зондов показывают, что электродвижущая сила E в свою очередь распадается на две части, из которых у анода имеет место встречная электродвижущая сила порядка 17 В, у катода же электродвижущая сила по величине около 5 вольт действует в направлении проходящего тока; таким образом суммарная электродвижущая сила направлена против внешнего поля. Для дуг между металлическими электродами величина электродвижущей силы больше, достигая 20 — 30 вольт, в то время как для углей с фитилем величина E оказывается в некоторых случаях отрицательной, т. е. действующей в ту же сторону, что и приложенная разность потенциалов.

14. Динамическая характеристика дуги.

До сих пор мы предполагали, что электродвижущая сила, под действием которой горит дуга, со временем не меняется. Все явления дугового разряда в значительной мере усложняются, когда приложенная разность потенциалов является переменной, так как в течение каждого периода разряд должен пройти ряд стадий, в частности прекратиться в момент, когда $I = 0$.

В случае дуг переменного тока имеет место ряд новых явлений, которые лежат в основе целого ряда технических применений, в частности выпрямления и генерирования колебаний. С этими явлениями легче всего познакомиться на характеристике дуги при переменной электродвижущей силе, которая в этом случае носит название „динамической характеристики“. Так как и напряжение V на зажимах дуги и сила тока в дуге i являются функцией времени [$V = V(t)$ и $i = i(t)$], то динамическую характеристику дуги [$V = V(i)$] мы получим, исключив параметр t . Вид этой характеристики оказывается различным для различных частот приложенной электродвижущей силы. В частности при $\frac{dV}{dt} = 0$ динамическая

характеристика превращается в статическую. Практически построение характеристик производится по точкам, причем для одновременного измерения тока и напряжения применяется осциллограф. Динамические характеристики при различных частотах ω приведены на рис. 19, на котором можно проследить переход от динамической характеристики к статической с уменьшением частоты приложенной электродвижущей силы. Следует отметить, что на этом рисунке приведена лишь половина характеристики, лежащая в первом квадранте. Общий вид характеристики приведен на схематическом рис. 20, из

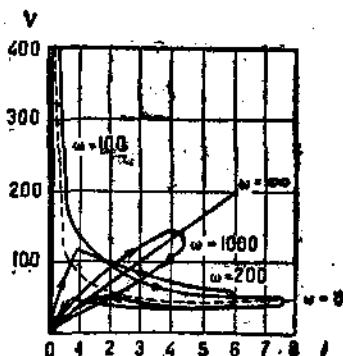


Рис. 19. Динамические характеристики дуги при различных частотах.

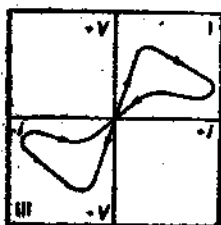


Рис. 20. Схема динамической характеристики дуги за полный период.

которого видно, что при изменении знака электродвижущей силы сила тока проходит через нуль, а затем через дугу идет ток в противоположную сторону, причем характеристика при этом направлении тока совершенно подобна той, которая имела место в течение первого полупериода. Кроме того видно, что при возрастающей силе тока кривая напряжения лежит выше, чем при убывающей. Это явление связано с тем, что благодаря тепловой инерции катод сохраняет высокую температуру и связанное с ней повышенное электронное испускание, что облегчает прохождение тока.

Особенно удобно изучать динамическую характеристику в связи со статической, накладывая переменное напряжение небольшой амплитуды на постоянную разность потенциалов, под действием которой горит дуга. При этом удастся исключить влияние вторичных явлений, связанных с угасанием и повторным зажиганием дуги при изменении знака электродвижущей силы.

Подробное изучение формы динамической характеристики при различных частотах имеет особое значение для вопроса о генерировании колебаний с помощью дуги. Мы им здесь заниматься не будем.

15. Выпрямляющее действие дуги.

Физических явлений, отражением которых является динамическая характеристика, мы более подробно коснемся ниже; отметим только, что приведенный на рис. 20 тип характеристики относится к симметричным дугам, т. е. к разряду

Между электродами одинаковыми в смысле материала, размеров, в также условий теплоотдачи. Это впрочем очевидно из характеристики: при переходе тока через нуль электроды как бы меняются местами, причем электрод, бывший катодом, оказывается анодом и наоборот. Мы видели, что существенным условием возникновения дугового разряда является наличие на катоде раскаленного светлого пятна. В обычных условиях¹ в дуге нагреваются оба электрода, причем анод имеет даже более высокую температуру чем катод, поэтому при изменении направления тока катод оказывается достаточно горячим (если только теплоемкость электродов и частота приложенной электродвижущей силы достаточно велики, а теплоотдача достаточно мала) для того, чтобы дуговой разряд мог бесперебойно продолжаться. Совершенно иную картину мы получим, если один из электродов будет искусственно поддерживаться при низкой температуре. Возможно ли вообще в этих условиях горение дуги при переменной электродвижущей силе? Не будем сейчас касаться вопроса о зажигании такой „несимметричной дуги“, которое может быть осуществлено с помощью ряда приемов, действие которых сводится к достаточному нагреванию второго электрода и будет описано при разборе работы практических типов дуговых выпрямителей. Ограничимся рассмотрением прохождения тока между электродами, из которых один все время поддерживается при низкой температуре, а другой нагрет в момент зажигания с помощью „пускового приспособления“. Приложив к этим электродам переменную электродвижущую силу, мы установим, что в течение полупериода, когда нагретый электрод является катодом, дуговой разряд может иметь место. При изменении знака электродвижущей силы катодом оказывается холодный электрод. При этом, если электродвижущая сила недостаточно велика для возникновения ионизационного разряда, ток в нашей системе проходить не будет, так как необходимое для дугового разряда условие — наличие „светлого пятна“ на катоде — не выполнено. Если теплоемкость электрода, служившего в течение первого полупериода катодом, достаточно велика, а теплоотдача мала, то его температура к началу следующего периода будет еще достаточно высокой для зажигания дуги, которая и возникнет при вторичном изменении направления электродвижущей силы. Таким образом дуга будет гореть с пропусками, причем ток будет проходить лишь в те полупериоды, когда поддерживаемый при низкой температуре электрод будет анодом. При соблюдении указанных условий относительно теплового режима второго электрода предварительное нагревание нужно лишь для зажигания дуги, так как в течение „холостого“ полупериода катод не успеет охладиться и его температура будет все время достаточной для зажигания дуги при соответствующем направлении электродвижущей силы.

Из приведенных соображений ясно, что в тех случаях, когда требуется использовать выпрямляющее, выпрямляющее действие дуги, электроды должны быть поставлены в совершенно различные условия в тепловом отношении. В качестве примера такой выпрямляющей дуги можно привести дуговой разряд между массивным медным и угольным электродами, причем катодом служит уголь, а анодом медь. Зависимость тока и напряжения для такой дуги приведены на рисунке 21, из которого видно, что выпрямляющее действие весьма совершенно.

На практике наибольшее распространение имеют закрытые дуги с ртутным катодом и угольным или железным анодом. Динамическая характеристика вы-

¹ Например в угольной или металлической дуге с одинаковыми электродами в воздухе при атмосферном давлении.

прямляющей дуги отличается от соответствующей характеристики для дуги симметричной, приведенной на рис. 20, причем основное различие заключается в форме кривой $V = V(i)$ для отрицательного полупериода. При совершенном отсутствии тока за этот полупериод — петля кривой $V(i)$ стягивается, обращаясь в отрезок оси ординат. Примером динамической характеристики выпрямляющей дуги может служить рис. 22, на котором приведены данные, перенесенные с осциллографических кривых тока и напряжения для дуги медь-уголь, приведенных на рис. 21.

Заканчивая на этом краткий обзор экспериментальных фактов и закономерностей, установленных для дуговой формы разряда, мы еще раз укажем, что несмотря на внешние отличия между дуговым и тлеющим разрядом, они очень сходны по существу, причем дуга отличается лишь некоторыми специфическими явлениями, имеющими место на катоде и в непосредственной близости от него. Поэтому, переходя к попытке теоретического

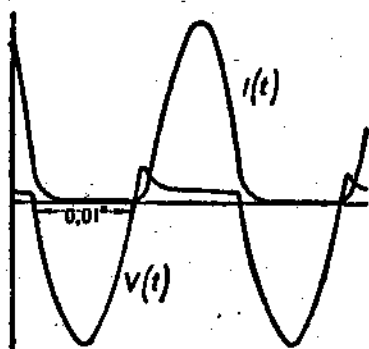


Рис. 21. Выпрямляющее действие дуги медь-уголь (осциллограмма).

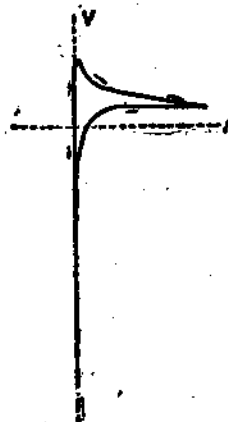


Рис. 22. Динамическая характеристика дуги медь-уголь.

обоснования некоторых закономерностей, наблюдаемых в дуге, мы остановимся лишь на явлениях у катода, ссылаясь в частях, касающихся анодного падения, явлений в положительном столбе и т. д., на соответствующие сведения, уже сообщенные ранее при описании тлеющего разряда.

16. Распределение тока у катода.

Прежде чем перейти к более детальному описанию катодного пятна и катодного падения в случае дугового разряда, рассмотрим, как суммарный ток, текущий в дуге около катода, распределяется между отдельными носителями электричества.

Как и в случае тлеющего разряда катод служит источником электронов, которые вырываются из него под действием ударов положительных ионов. Пусть плотность тока, вызванная движением вырванных из катода электронов, равна j_- .

Мы видели в главе об испускании электронов раскаленными телами, что в тех случаях, когда единственными носителями электричества являются испускаемые одним из электродов электроны, вблизи этого электрода при достаточно интенсивном испускании образуется отрицательный объемный заряд, уменьшающий силу поля и препятствующий прохождению тока. В случае дугового разряда вблизи катода поле должно быть наоборот усилено (катодное

падение потенциала). Следовательно прилипающие к катоду положительные ионы должны не только компенсировать отрицательный объемный заряд, но и создавать катодное падение.

Поэтому мы можем весь ток, создаваемый движением положительных ионов, представить в виде двух частей: J_+ — компенсирующей отрицательный объемный заряд электронов и J_+ — поддерживающей катодное падение. Таким образом общая плотность тока у катода равна:

$$J = j_- + J_+ + J_+$$

Величина $J_+ = aj_-$, где a как правило значительно меньше единицы. Согласно нашим обозначениям катодное падение V зависит от J_+ , откуда:

$$V = V(J_+) = V[J - j_-(1 + a)],$$

причем с увеличением тока J_+ катодное падение V увеличивается. Экспериментальные факты говорят за то, что катодное падение уменьшается с увеличением суммарной плотности тока, стремясь к некоторой постоянной величине. Отсюда следует, что аргумент $[J - j_-(1 + a)]$ должен точно так же уменьшаться, стремясь к некоторому пределу.

Уменьшение катодного падения значило бы, что электронный ток (эмиссия катода) j_- растет быстрее, чем суммарный ток J , что, вообще говоря, можно очень легко допустить.

Постоянству катодного падения при больших плотностях тока должно соответствовать и постоянство величины $[J - j_-(1 + a)]$. Это обстоятельство может быть наиболее естественным образом объяснено тем, что начиная с определенной плотности тока, площадь участка катода, принимающего участие в разряде, начинает расти пропорционально силе разрядного тока.

Таким образом наши в высшей степени общие рассуждения приводят к представлению о катодном пятне, площадь которого пропорциональна силе тока в дуге. В таком предположении независимость катодного падения от силы тока делается совершенно очевидной.

17. Энергетический баланс катода.

Некоторые дальнейшие данные относительно величины ионной и электронной составляющих тока у катода можно извлечь из сравнения количеств энергии, получаемых и отдаваемых катодом при стационарном дуговом разряде. Правда, все эти заключения страдают значительной неточностью, благодаря затруднительности учета отдельных частей энергии (как-то: теплоотдачи через конвекцию и излучение). Приводимый ниже подсчет относится к случаю дуги, в которой сведены до минимума различные химические реакции, могущие вносить весьма существенные и вместе с тем чрезвычайно трудно учитываемые изменения в энергетический режим катода. Наибольшую роль играют эти химические реакции в металлических и особенно угольных дугах, горящих при атмосферном давлении в химически активном газе (например в воздухе), и роль их сводится к минимуму в дугах, горящих при пониженном давлении или в атмосфере инертного газа (например — вольфрамовая точечная лампа).

Рассмотрим сперва, каковы количества энергии, сообщаемые катоду при стационарном горении дуги. Общее количество энергии, подводимой за единицу времени, состоит из двух основных частей: кинетической энергии E_k , сообщаемой ударами ионов, и энергии конденсации ионов E_c , выделяемой при-

падающими к катоду ионами (аналогично энергии конденсации пара на поверхности твердого тела). Величина E_s может быть выражена следующим образом:

$$E_s = (j_+ + j_-) V_c,$$

где V_c — выраженная в вольтах энергия ударяющихся о катод ионов, которая практически равна катодному падению.

E_s пропорционально общему количеству падающих на катод ионов, т. е. той же величине $j_+ + j_-$.

Отдаваемая катодом энергия состоит из следующих частей:

1) Работы выхода электронов A_e , равной $j_- \times P$, где P — скачок потенциала в поверхностном слое катода (см. главу о термо- и фотоэлектронном испускании).

2) Энергии испарения катода A_a . Эта величина пропорциональна массе испарившегося вещества M_a . Взвешиванием катода мы можем определить лишь меньшую величину M_m , которая отличается от M_a на величину массы M_j тех ионов, которые за единицу времени переносятся на катод при прохождении тока. Таким образом $M_a = M_m + M_j$, причем величина M_j может быть вычислена из плотности ионного тока $j_+ + j_-$, если известна масса иона. При подсчете однако нужно принять во внимание, что с катода испаряются *нейтральные* атомы, тогда как конденсируются — падающие на него *ионы*.

3) Энергии $A_{\text{ох}}$ представляющей собой потери на охлаждение испусканием, конвекцией и т. д.

При стационарном разряде сумма величин E должна быть равна сумме величин A , откуда может быть получено соотношение, связывающее величины $(j_+ + j_-)$.

j_- . Подсчеты энергетического баланса на катоде показали, что в угольной и вольфрамовой дугах ионный ток $(j_+ + j_-)$ составляет ничтожную часть электронного, так что у катода почти весь ток переносится электронами. Вместе с тем у катода ртутной дуги электронный ток не превышает половины общего тока. Для примера в таблице 12 сопоставлены величины отдельных частей энергии, сообщаемой и отдаваемой катодом ртутной дуги, выраженные в ваттах на один ампер тока в дуге.

Таблица 12.

	Сообщенная энергия	Отдаваемая энергия
Теплопроводность	2,68	Удар ионов 4,2
Теплота испарения	2,8 — 3,9	Конденсация ионов 7,1
Работа вырывания	3,9	
Излучение	0,04	
	5,5 до 6,6 j_-	11,3 $(j_+ + j_-)$

18. Термическая теория электронного испускания на катоде.

Изложенные соображения касающихся энергетического баланса на катоде, как мы видим, дают некоторые сведения об относительной величине ионного и электронного токов. Вместе с тем они ничего не говорят о механизме вырывания электронов из катода. Наиболее простым предположением о выры-

вании этих электронов является соображение, положенное в основу термической теории испускания катода дуги. Термическая теория полагает, что часть поверхности электрода, подвергающаяся интенсивной бомбардировке ионами, нагревается до весьма значительной температуры, достаточной для мощного электронного испускания, которое представляет не что иное, как известное нам испускание электронов накалированными телами. Таким образом, согласно термической теории, испускание электронов катодом сводится целиком к эффекту Ричардсона. Так как это явление хорошо изучено, то, если это предположение правильно, оно представляет дальнейший крупный шаг в понимании явления, происходящих на катоде дуги. Простым методом проверки этого положения была бы сравнительная оценка величины термоэлектронного тока, вычисленного по формуле Ричардсона из температуры светлого пятна, с непосредственно измеренным электронным током. К сожалению до сих пор отсутствуют более или менее точные данные относительно температуры светлого пятна, поэтому такой подсчет был выполнен лишь для вольфрамовой дуги в атмосфере инертного газа.

Для этого случая термическая теория может считаться приемлемой. Однако некоторые соображения, которых мы коснемся, разбирая светлое пятно, заставляют критически отнестись к термической теории в применении к ртутному катоду. Можно думать, что в этом случае электронное испускание обязано нескольким причинам. Все же мы остановимся несколько подробнее на положениях термической теории, так как она дает возможность несколько ближе подойти к толкованию статической и динамической характеристик. Если предположить, что в основе явления дугового разряда лежит электронное испускание катода, то естественно допустить, что произведение температуры светлого пятна T на его площадь F зависит с одной стороны от выделяемой в дуге энергии VI , с другой — от тех количеств энергии, которые отводятся с катода путем теплопроводности, излучения и т. п.

Простейшим предположением относительно связи всех этих величин является выражение:

$$VI = WFT, \quad (24)$$

где W — тепловые потери в единицу времени при $FT = 1$. Обозначая величину произведения FT через S , мы можем полученное соотношение переписать в виде: $VI = WS$. Соответствующее соотношение для дуги переменного тока может быть написано на основании следующих соображений: обозначая через Q количество теплоты, заключенное в каждый момент в электродах и газовом промежутке, мы можем предположить, что $Q = KS$, т. е. что оно в каждый момент времени пропорционально произведению площади светлого пятна на его температуру. Следовательно при изменении Q с течением времени мы можем написать $\frac{dQ}{dt} = K \frac{dS}{dt}$ и, обобщая уравнение (24), получим общее соотношение:

$$VI = WS + K \frac{dS}{dt}. \quad (25)$$

Разумеется приведенные выше рассуждения не представляют собой вывода соотношений (24) и (25). Мы лишь выразили мощность дуги через некоторый новый параметр S и попробовали дать ему физическое толкование. Выражения (24) и (25) определяют мощность дуги в функции температуры и площади катодного пятна. Для дальнейших заключений, необходимых при проверке справедливости написанных соотношений, нужно положить, что и сопротивление

дуги представляет также однозначную функцию параметра S , т. е. что $\frac{1}{T} = \varphi(S)$.

Зная статическую характеристику дуги и выражение для мощности, можно определить вид функции φ . Таким образом например для характеристики

$$V = \frac{a}{I} + b:$$

$$\varphi(S) = \frac{a^2 WS}{(WS - b)^2}.$$

Пользуясь этим новым термином параметром, можем аналитически или же графически построить динамическую характеристику дуги, зная ее статическую характеристику. Любопытно, что несмотря на весьма примитивные и по существу неправильные предположки, которые сводят все явления в дуге к температуре и сечению катодного пятна, не принимая во внимание многих процессов с их константами (подвижность, коэффициент рекомбинации, концентрации ионов и т. п.), — общий вид получаемых построением динамических характеристик подобен экспериментально наблюдаемым.

В частности вполне удается объяснить зависимость формы динамической характеристики от частоты электродвижущей силы. Вместе с тем численные согласия с данными опыта получается неважное, поэтому более подробно на положении термической теории мы не останавливаемся, отсылая интересующихся к трудам автора этой теории Симона.¹

19. Теория светлого пятна.

Прежде чем перейти к более подробному разбору катодного падения в дуге, нам следует остановиться на наиболее характерном для дугового разряда явлении светлого пятна. Здесь для нас будет более всего интересны три обстоятельства: резкость пятна, его температура и наконец его подвижность. Катодное пятно, как известно, представляется на глаз вполне ярко очерченным, ослепительно светящимся участком катода. Прежде всего возникает вопрос: может ли, принимая во внимание теплопроводность электрода, существовать резко ограниченная небольшая площадка, нагретая до очень высокой температуры. С этим предположением трудно помириться, если даже допустить, что удары ионов, т. е. подвод энергии, происходят действительно на достаточно малой площадке. Объяснение появления резко очерченного светлого пятна можно найти на рис. 23. На нем приведены результаты подсчета для упрощенного случая (бесконечный плоский катод, подвод энергии производится на ограниченной круговой площадке, в разрезе заштрихованной на рисунке), в предположении отсутствия испарения катода и других побочных явлений. Сплошная кривая, представляющая распределение температуры, как и следовало ожидать, имеет довольно размытый максимум, так что в этом смысле о резко выделенном участке говорить не приходится.

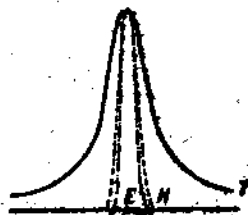


Рис. 23. Распределение температуры испускания и электронного испускания в светлом пятне.

Однако, если вычислить из этой температурной кривой 1) величину яркости испускаемого света, 2) термоэлектронный ток с единицы поверхности, то

¹ Physik. Zeitschrift, 6, 310 (1905); подробное изложение термической теории с применением ее практического применения можно найти также в статье Lange, Ann. d. Physik, 32, 399 (1910).

мы получим совершенно другую картину. Пунктирные кривые H и E представляют собою соответственно яркость и электронное испускание катода на единицу поверхности. Таким образом оказывается, что размытый максимум температуры соответствует очень резкому максимуму в кривых яркости и эмиссии, т. е., что в оптическом, равно как и в электрическом, отношении светлое пятно является действительно резко выраженным небольшим участком. Обобщение упрощенного расчета на случай наличия потерь на лучеиспускание и испарение электрода, равно как и на светлое пятно, перемещающееся с небольшой скоростью по поверхности катода, не приводит ни к чему существенно отличному от приведенных результатов.

Таким образом вопрос о резкости катодного пятна оказывается легко разрешимым. Несколько хуже обстоит дело с его температурой. Температура светлого пятна, согласно термической теории, должна быть достаточной для появления термоэлектронного испускания порядка многих ампер на квадратный сантиметр. Такие температуры легко могут иметь место в случае угольных или вольфрамовых электродов. Вместе с тем трудно допустить существование подобных температур светлого пятна на поверхности легколетучего материала, а в особенности для ртути. Однако же, если посмотреть на процесс испарения твердого тела с термодинамической точки зрения, то можно показать, что температура поверхности испаряющегося твердого вещества зависит только от количества подводимой энергии и при достаточно интенсивном подводе энергии может на много превышать "температуру испарения"; так что с этой стороны термическая теория не встречает непреодолимых затруднений. Однако такие затруднения встают при рассмотрении вопроса о подвижности светлого пятна. Непосредственными экспериментами (дуга между вращающимся диском и неподвижным электродом, а также дуга, вращаемая магнитным полем) удалось показать, что светлое пятно может перемещаться со скоростью, достигающей нескольких десятков и даже в некоторых случаях сотен метров в секунду. Точного подсчета температуры, до которой успеет нагреться участок катода, принимающий участие в разряде, в случае быстро движущегося пятна, провести не удается, благодаря тому, что как-раз для этих случаев неизвестна площадь светлого пятна. Все же даже грубо ориентировочный подсчет показывает, что при этом нельзя ожидать местного нагрева катода до температуры, превышающей несколько сот градусов. Можно наметить два пути для объяснения этого недоразумения. С одной стороны, сохраняя всецело представления термической теории, сводящей все электронное испускание катода к термоэлектронному, т. е. продолжая настаивать на достаточно высокой температуре катодного пятна, можно допустить, что светлое пятно не перемещается с равномерной скоростью, а перескакивает почти мгновенно на достаточно большое расстояние. Другими словами можно предположить, что светлое пятно достигается с паузами, останавливаясь в каждом месте на промежуток времени, достаточный для соответственного разогревания участка поверхности катода. С другой стороны, принимая более или менее равномерное движение светлого пятна и в связи с этим допуская, что его температура недостаточно высока для объяснения электронной эмиссии катода, можно предположить, что выход электронов облегчается тем обстоятельством, что сила поля у поверхности катода достигает очень большой величины (порядка 10^5 — 10^6 $\frac{\text{вольт}}{\text{см}}$). Такие поля, которые дей-

ствительно, как мы увидим ниже, имеют место вблизи поверхности катода, могут в некоторой мере уравновесить действие двойного слоя на поверхности металла и облегчить выход электронов. На основании имеющегося опытного

материала в настоящее время представляется затруднительным предпочесть которое-нибудь из приведенных объяснений подвижности светлого пятна.

20. Катодное падение в дуге.

Нам остается ознакомиться с особенностями катодного падения потенциала в дуге. Теория катодного падения в дуге по существу мало отличается от соответствующих заключений для случая тлеющего разряда и следовательно встречает те же затруднения и отличается теми же недостатками. Вместе с тем построение теорий катодного падения в дуге имеет некоторые специфические трудности, причем основной из них является неизвестность давления электродных паров в непосредственной близости от катода, т. е. именно в области катодного падения. Теория катодного падения имеется сейчас лишь при упрощающих предположениях о том, что, во-1-х, ионы при каждом ударе полностью отдают свою энергию, во-2-х, что в области катодного падения рекомбинация не имеет места. В этих предположениях между плотностью тока J_+ , обуславливающего катодное падение, и величиной этого падения V можно получить соотношение:

$$J_+ = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{5}{3} V \right)^{\frac{3}{2}} \frac{\left(\frac{\pi}{2} \frac{e}{m} \lambda \right)^{\frac{1}{2}}}{d^{\frac{5}{2}}} \quad (26)$$

Здесь e , m и λ — соответственно заряд, масса и длина свободного пути для положительного иона, а d — толщина слоя, в котором имеет место катодное падение. В этом соотношении неизвестны две величины: J_+ и d . Вместе с тем мы можем установить порядок величины d , приравняв величину J_+ , вычисленную из соотношения (26), соответствующей величине, которую можно получить из рассмотрения энергетического равновесия на катоде, если только известно отношение нейтрализующего ионного тока к электронному ($a = \frac{J_+}{J_-}$).

Такое сравнение дает d порядка длины свободного пробега для электрона. Определяя силу поля $E = \frac{V}{d}$, мы получаем величину около $10^3 \frac{\text{вольт}}{\text{см}}$. Подтверждение реального существования столь значительных электрических сил у поверхности катода можно видеть в оптическом исследовании спектра катода дуги, которое установило сильно выраженное смещение и расширение спектральных линий (эффект Штарка), вызванное действием электрического поля на испускающие свет атомы газа. На этом мы закончим рассмотрение явлений дугового разряда. Укажем лишь, что некоторые детали процессов, происходящих в закрытых дугах, в частности в ртутно-угольной или ртутно-железной вакуумных дугах, будут освещены подробнее при описании работы дуговых выпрямителей.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПРОХОЖДЕНИЕ ТОКА ЧЕРЕЗ ЖИДКОСТИ И ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЖИДКОСТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.

1. Ток в электролите.

Растворы электролитов (так же и металлы) подчиняются закону Ома вплоть до очень высоких напряжений электрического поля. В отличие от металлов прохождение тока через электролит сопровождается изменением их состава.

По современным представлениям все молекулы растворенного вещества диссоциируют на ионы, движение которых к электродам под действием приложенного поля и создает ток через раствор. Достигнув электрода, ионы разряжаются и переходят в атомное состояние, образуя соответствующее вещество на металле электрода.

Все явления электролиза строго подчиняются установленному Фарадеем закону, связывающему количества выделяющегося вещества с количествами протекшего в цепи электричества:

$$P = zIt,$$

где P —вес вещества в граммах, I —сила тока в амперах, t —время в секундах, z —электрохимический эквивалент выделяющегося иона.

2. Поляризация.

Так же как и подчинение закону Фарадея, для электролитов характерно наличие в цепи электродвижущей силы поляризации. Если в цепь, состоящую из какого-либо источника постоянного тока, включить электролитическую ванну, легко заметить, что при малых напряжениях на электролите (порядка нескольких вольт) сила тока через нее не остается постоянной, а убывает с течением времени. При замыкании накоротко электродов электролита в цепи можно заметить ток обратного направления тому, который пропусклся через электролит; этот ток также быстро падает со временем.

Явление поляризации с образованием в электролите внутренней электродвижущей силы объясняется тем, что первые же порции продуктов выделения меняют материал и свойства электродов; возникает элемент с определенной э. д. с., которая, накладываясь на приложенное напряжение, вызывает падение тока и явление обратного тока при замыкании электродов накоротко.

Сила тока I через электролит таким образом выражается формулой:

$$I = \frac{V - P(t)}{R}, \quad (27)$$

где V —приложенная разность потенциалов, P —потенциал поляризации, являющийся функцией времени t . Потенциал поляризации не достигает в водных растворах электролитов больших значений, максимальные его величины не превосходят 2-3 вольт.

Поляризационные явления в электролитах позволяют легко собрать системы, которые обладали бы выпрямительным действием; здесь можно варьировать материал и поверхность электродов и род электролита. Этого рода системы не могут однако иметь технического значения; максимальные выпрямляемые напряжения не могут здесь быть больше; 2-3 вольт.

Уже давно было известно, что в некоторых электролитических ваннах, при соответствующем подборе электродов, встречная э. д. с. достигает очень больших значений. Если такую ванну поместить в цепь постоянного тока последовательно с большим сопротивлением, величина которого можно поддерживать ток через систему постоянным, то напряжение, которое оказывается на элементе, будет расти с течением времени так, как это указано на рис. 24. Вначале рост напря-

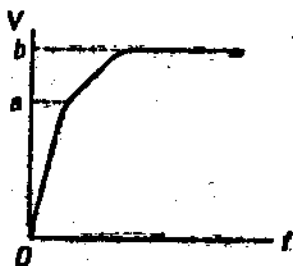


Рис. 24. Рост э. д. с. поляризации с временем.

жения пропорционален времени; при некотором вполне определенном при заданных условиях опыта напряжении a на аноде появляются маленькие искры, напряжение далее тоже растет линейно, но уже значительно медленнее, чем раньше; при напряжении b на поверхности анода появляются желтые искры, и далее напряжение остается постоянным. Не все металлы и не во всех электролитах вызывают это явление. Следующие 17 металлов, некоторые во всех, другие только в некоторых электролитах, дают этот большой, иногда до 500 вольт, рост напряжения на электроде: Ca, Be, Mg, Zn, Cd, Al, Sn, Pb, Nb, Ta, Sb, Bi, W, Fe, Co, Ni.

8. Формовка электродов.

Процесс роста напряжения получил название процесса формовки. В процессе формовки на аноде возникает очень тонкий, пористый, твердый слой окисла металла. Толщина слоя, являющегося хорошим диэлектриком, растет в процессе формовки. Можно извлечь электрод из ванны и, положив на него ртутную каплю, измерить емкость конденсатора — металл анода — слой — ртуть. Толщина слоя, определяемая таким образом, оказывается порядка 0,001 мм. Такие же измерения емкости можно произвести в формирующей электролитической ванне, накладывая на элемент переменный ток. Эти измерения привели к величине емкости приблизительно в 10 раз большей, чем при измерении со ртутью для сухой пластины. Многочисленные исследования, посвященные этому расхождению, показали, что в порах твердого слоя диэлектрика образуется очень тонкий слой газа, обуславливающий большую емкость системы. Этот же слой газа вызывает вентильное действие заформованного элемента; при включении его в цепь переменного тока он дает выпрямление для напряжений от 200 до 500 вольт в зависимости от металла, раствора электролита и его концентрации.

4. Вентильное действие.

Причина вентильного действия лежит в разной работе выхода электронов из металла анода и электролита — двух обкладок на газовом промежутке. Для металла эта работа значительно ниже, и ток при катоде на металле проходит даже при небольших напряжениях; для другого направления тока, когда катод на электролите, работа выхода электронов выше, разряд затруднен, система будет обладать вентильным действием.

Необходимым условием выпрямления является устойчивость слоя твердого диэлектрика для того направления тока, когда катод оказывается на вентильном металле. Значительная часть металлов, дающих асимметричную характеристику для постоянного тока, непригодна для переменного; к ним относятся например Cd, Sb, Bi.

Следующие величины являются существенными при процессе формовки:

- 1) скорость роста напряжения между точкой O и a рис. 24 (градиент a);
- 2) та же скорость для участка ab (градиент b);
- 3) максимальное напряжение элемента, напряжение, при котором дальнейший рост его прекращается. При этом напряжении разряд идет через газ и в том случае, когда катодом оказывается электролит;
- 4) минимальное напряжение; ток через вентиль не проходит ни в одном из направлений ниже некоторого определенного напряжения, предельная величина которого для катода на вентильном металле и дает значение минимального

напряжения; оно очевидно характеризует работу вырывания электронов из металла вентильного электрода.

Рассмотрим более подробно каждый из этих 4-х пунктов в отдельности.

1. Градиент a не зависит от концентрации электролита. С повышением температуры он сильно падает, величина изменений различна в различных растворах. Градиент a обратно пропорционален плотности тока; одинаковым количествам протекшего через элемент электричества отвечают одни и те же напряжения формовки. При очень малых плотностях тока замечаются отступления от этой закономерности, а иногда и вообще не наблюдается роста напряжения на электроде. Величина градиента a зависит как от металла, так и от природы раствора; для тантала при плотности тока в 2 мА/см^2 в водных растворах он около 60 В/мин .

2. Градиент b значительно меньше градиента a и подчиняется в общем тем же зависимостям, что и градиент a ; нужно заметить однако, что данные здесь слишком несистематичны и недостаточны, чтобы можно было сделать какие бы то ни было обобщающие заключения.

3. Максимальное напряжение, величина которого представляется наиболее существенной в технических применениях и которое определяет величину выпрямляемого переменного напряжения, хорошо изучено для разных металлов и растворов. Прекрасным подтверждением приведенных выше представлений Гюнтершульце о механизме выпрямления в рассматриваемых системах является независимость максимального напряжения от металла анода; эта величина не зависит также от плотности тока и температуры электролита. Концентрация свободных ионов и природа анионов наоборот сильно сказываются на величине максимального напряжения. По отношению к последней зависимости Гюнтершульце установил несколько общих закономерностей, имеющих глубокий физический смысл.

В таблице 13 приведены максимальные напряжения для тантала в $0,05 \text{ н-}$ растворе ряда свободных от металла анионов, и мы видим, что они почти для всех анионов одинаковы, колеблясь около значения в 478 вольт.

Таблица 13.

Максимальное напряжение тантала в $0,5 \text{ н-}$ растворе анионов свободных от металлов.

Анион	Максимальное напряжение, в вольтах	% отступления напряжения от среднего	Анион	Максимальное напряжение, в вольтах	% отступления напряжения от среднего
$\text{OH}' \dots\dots$	446	-6,8	$\text{NO}_3' \dots\dots$	475	-0,8
$\text{HCOO}' \dots$	488	+2,0	$\text{H}_2\text{PO}_4' \dots\dots$	435	-9,1
$\text{C}_2\text{H}_3\text{COO}' \dots$	508	+6,2	$\frac{1}{2}\text{HAsO}_4'' \dots$	447	-6,6
$\text{C}_2\text{H}_5\text{COO}' \dots$	520	+8,7	$\text{BO}_3' \dots\dots$	487	+1,8

В таблице 14 представлены максимальные напряжения для анионов, содержащих разные металлы. Величина напряжения зависит от металла, входящего в анион, и одинакова для всех анионов, содержащих его в своем составе. Гюнтершульце по значениям максимального напряжения мог сделать несколько чрезвычайно интересных заключений о прочности связи электрона в ионах разных структур.

Таблица 14.

МАКСИМАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТАНТАЛА В 0,05 N-РАСТВОРЕ РАЗЛИЧНЫХ АНИОНОВ С МЕТАЛЛАМИ Cr, Fe, Pt.

Металл	Анион	Максимальное напряжение, в вольтах	Металл	Анион	Максимальное напряжение, в вольтах
Cr.....	$\frac{1}{2}\text{Cr}_2\text{O}_7''$	131	Fe.....	$\frac{1}{2}\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}''$	76
	$\frac{1}{2}\text{CrO}_4''$	141		$\frac{1}{2}\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_2''$	85
Pt.....	$\frac{1}{2}\text{PtCl}_6''$	20			
	$\frac{1}{2}\text{PtCl}_4''$	35			

С возрастающим разведением электролита растет и максимальное напряжение таким образом, что возрастание разведения на 1% сопровождается в среднем ростом максимального напряжения на 0,24%. При очень малых концентрациях максимальное напряжение достигает очень высоких значений. Для алюминиевого электрода в растворе борной кислоты и буры Гюнтершульце нашел следующую эмпирическую зависимость V (максимального напряжений) от v (разведения электролита в литрах на граммэквивалент):

$$V = 514,5 \log v - 330.$$

Наибольшее измеренное максимальное напряжение было 1900 вольт.

4. Минимальное напряжение зависит от металла вентиля, рода и концентрации электролита. Величина минимального напряжения для тантала в 0,05 N-растворах некоторых электролитов представлена в таблице 15.

Таблица 15.

Электролит	Минимальное напряжение, в вольтах	Электролит	Минимальное напряжение, в вольтах
KOH.....	9,6	NaNO_3	14,4
KAlO_2	4,3	KNO_3	11,7
NaHCO_3 ..	13,2	NaNO_2	17,2

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

МЕХАНИЗМ ТОКА В ТВЕРДЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ.

1. Природа тока.

Твердыми выпрямителями являются обычно полупроводники; по характеру проводимости они могут быть разделены на:

- 1) полупроводники с электронной проводимостью (многие окислы и сульфиды);
- 2) полупроводники с ионной проводимостью;
- 3) полупроводники со смешанной проводимостью.

Основным моментом любой теории выпрямления является вопрос о природе электропроводности изучаемого объекта; решение этой задачи сводится к исследованию соблюдения закона электролиза Фарадея. Полная его применимость для исследуемого тела возможна лишь в случае чисто ионного переноса тока; по величине наблюдаемых отступлений от закона легко определить процентное содержание в общей электропроводности электронной части; полное отсутствие продуктов электролиза указывает на электронный характер тока. В качестве другого критерия природы тока можно указать на наличие Холл-эффекта в электронно-проводящих и на явление поляризации в ионно-проводящих телах.

2. Ионная проводимость.

Существование ионной проводимости и строгое следование закону Фарадея для стекла, кварца и ряда других твердых тел еще в 1884 г. были показаны работами Варбурга. В 1904 г. Габер (Haber) и Толлуцко (Tollutzko) нашли, что закон Фарадея строго выполняется при пропускании тока через нагретый BaCl_2 . Позднее работами ряда других исследователей было показано, что ионная проводимость характерна для всех твердых солей металлов за исключением сульфидов и оксидов.

Прохождение ионного тока через твердые тела сопровождается рядом особенностей, из коих для нас особенно интересными являются: 1) рост дендритов, 2) образование у электродов плохо-проводящих слоев. Рост дендритов известен и в водных растворах электролитов (свинцовое дерево в растворе свинцового сахара), но там его можно наблюдать лишь в редких случаях; в твердом веществе наоборот оно как правило наблюдается почти всегда. Явление это заключается в том, что металл при электролизе откладывается на катоде не в виде равномерного слоя, но растет из какой-нибудь точки его внутрь тела в виде весьма тонкой нити, которая уже вскоре после замыкания тока соединяет накоротко электроды образца. Такое короткое замыкание часто возникает еще тогда, когда количество выделившегося металла едва поддается измерению. Явление роста дендритов чрезвычайно затрудняет определение характера проводимости тела, и так как оно стало известно еще совсем недавно, то данные старых исследователей достоверны только в редких случаях. В образце с ионной проводимостью, где возможен рост дендритов, очень легко, конечно, сделать ошибку, изучая соблюдение закона Фарадея; очевидно на опыте будет обнаружена электронная проводимость в такой соли, так как большая часть тока будет идти по имеющим малое сопротивление дендритам, замыкающим электроды.

Тубандт (Tibandt), давший ряд методов устранения роста дендритов, тем самым открыл целую область науки; на его методах мы в дальнейшем остановимся.

В прозрачных веществах образование дендритов легко наблюдать простым глазом или еще лучше в микроскоп. В кристаллах каменной соли, например при $600 - 700^\circ$ при напряжении в $200 - 400$ вольт, можно видеть, что со стороны катода начинают расти фиолетовые нити натрия, при перемене направления тока они постепенно исчезают. При охлаждении образца нити распадутся на микроскопические частицы Na, которые придают кристаллу красную, желтую или голубую окраску.

Рост дендритов идет тем быстрее, чем выше напряжение, что ведет к кажущимся отступлениям от закона Ома. Причины описываемого явления остаются еще до настоящего времени совершенно неясными; можно только

сказать, что рост дендритов в сильной степени зависит от строения тела; в одном и том же веществе он идет различно в монокристалле, охлажденном расплаве и спрессованном порошке.

Было предложено несколько методов устранения роста дендритов в теле, но только Тубандту удалось хорошо решить эту задачу.

Дендриты начинают расти внутри тела только в том случае, если на катоде выделится металл хотя бы и в небольшом количестве; этот участок электрода дает начало развитию нити. Воспользовавшись катодом из водного раствора электролита, Тубандт устранил всякое выделение металла на поверхности полупроводника и вместе с этим устранил и рост дендритов. Схема его опытов представлена на рис. 25. Здесь *пл* — полупроводник, *А* — металлическая пластина (анод), *С* — стеклянный сосуд с электролитом, *К* — металлический катод. При включении напряжения положительные ионы полупроводника, двигаясь в направлении, указанном стрелкой, дойдут до нижней поверхности образца; если бы электрод *К* касался поверхности, ионы выделились бы на нем, и начался бы рост дендритов; в указанной постановке опыта этого не случится, положительные ионы полупроводника будут реагировать с анионами раствора, металл будет выделяться только на катоде *К*. Применяя такую схему, Тубандт исследовал большое число различных солей и получил достоверные данные о природе проводимости ряда веществ.

Рост дендритов представляет характерное явление на катоде в ионно-проводящих телах. На аноде столь же характерно для полупроводников образование плохо-проводящих слоев. Впервые это явление было замечено для стекла Варбургом. В нагретом до 300—400° стекле ток при включении напряжения падает и через несколько минут равен лишь 0,01 своего первоначального значения. Это явление носит необратимый характер, что и позволило Варбургу считать, что его опыты не могут быть объяснены поляризацией. В противоположность поляризационным явлениям, при замыкании электродов стекла накоротко в цепи нельзя обнаружить обратных токов; при повторных наложениях напряжения спадающая сила тока со временем не происходит, она сразу равна предыдущему малому значению. Варбург объяснил происходящие явления гипотезой образования у анода плохо-проводящего слоя кварца. Стекло можно рассматривать как Na_2SiO_3 по отношению к электрическим явлениям; при электролизе к катоду идут ионы Na^+ , и выделение металла здесь строго отвечает закону Фарадея; на аноде оказываются ионы SiO_3^{2-} , распадающиеся на кислород, и SiO_2 , образующий слой у электрода.

Наблюдения Варбурга были сделаны в 80-х годах прошлого столетия, и только совсем недавно это явление было пересмотрено и дополнено рядом новых закономерностей. Курчатов и Синельникова в Лаборатории Иоффе в Рентгеновском институте научили распределение потенциала в стекле при прохождении тока, и полученные результаты полностью подтвердили заключения Варбурга. Оказалось, что равномерное при наложении напряжения распределение потенциала в стекле искажается с течением времени и около анода образуется резкий скачок. Измерения толщины слоя SiO_2 позволили выяснить, что количество выделяющегося SiO_2 строго отвечает закону Фарадея. Здесь важно отметить, что толщина плохо-проводящих слоев (не только в стекле, но и в других веществах) всегда очень мала; толщина слоя определяется количеством протекшего электричества и, так как сила тока с увеличением толщины падает, то при обычных условиях (разность потенциалов на обкладках в 200 —

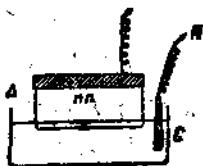


Рис. 25. Схематическое изображение аппарата опытов Тубандты.

300 вольт) трудно получить слои непроводника более тонкие, чем тысячные или в крайнем случае сотые доли миллиметра.

Формовка является достаточно общим свойством ионных полупроводников и диэлектриков. Она наблюдается в ряде окисей (PbO_2 , Cu_2O и др.), сульфидов (Ag_2S , Cu_2S , CuS), иодидов (AgI , NaI , KI), в фосфорнокислых, кремнекислых и борных стеклах, слюде и т. д.

3. Электронная проводимость.

В полупроводниках с электронной проводимостью механизм тока ничем не отличается от тока в металлах; такие полупроводники строго подчиняются закону Ома, сила тока в них со временем не меняется и никакого изменения в составе проводника не происходит.

Температурный коэффициент сопротивления очень хорошо характеризует характер проводимости. В ионных полупроводниках он отрицателен, сопротивление резко падает с повышением температуры (в некоторых случаях в 10 000 раз при нагревании на 100°); сопротивление ионных полупроводников лучше всего может быть представлено формулой:

$$\log R = \frac{A}{T} + B, \quad (28)$$

где A и B — константы, T — абсолютная температура. В проводниках со смешанной электронной и ионной проводимостью зависимость сопротивления от температуры имеет весьма сложный характер; это вызывается тем, что относительное содержание обеих частей тока меняется при изменении температуры и каждая составляющая своеобразным образом зависит от температуры. В полупроводниках со смешанной проводимостью протекают явления роста дендритов и формовки совершенно так же, как и в ионных полупроводниках; благодаря наличию электронного тока указанные процессы здесь несколько замедляются и часто лучше доступны детальному изучению.

ВВЕДЕНИЕ.

ОСНОВЫ ВЕНТИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ.

Выпрямление или преобразование переменного как однофазного, так и многофазного тока в постоянный, может быть произведено весьма различными путями. В одних случаях это преобразование осуществляется чисто электрическим путем, без перехода всей или только части энергии в магнитную, механическую или тепловую, а в других случаях выпрямление идет путем перехода энергии в другой вид.

В большинстве случаев однако, даже при чисто электрическом преобразовании, часть энергии претерпевает промежуточный переход в какой-либо другой вид, например магнитный.

Необходимость такого перехода особенно наглядна из рассмотрения выпрямления однофазного тока в постоянный, без пульсаций. Как известно, переменный синусоидальный ток имеет мгновенную мощность, пульсирующую от некоторого нулевого значения до максимального значения. Частота этих пульсаций равна $2f$, где f частота переменного тока. С другой стороны мгновенные мощности выпрямленного тока, не имеющего пульсаций, постоянны. Сопоставляя эти два положения, видим, что в ту часть периода, когда мощность переменного тока меньше мощности выпрямленного тока, постоянство последнего достигается за счет энергии, запасенной за другую часть периода. Это запасание может быть произведено чисто электрическим путем в соответствующих статических конденсаторах или же магнитным путем, помощью реактивных катушек. Первый способ выгоден тогда, когда имеют место значительные пульсации напряжения, второй тогда, когда имеют место большие пульсации тока. Часто, особенно при высоких требованиях, предъявляемых к выпрямленному току в смысле постоянства его, применяются оба способа. В случае преобразования путем перехода через механическую энергию сглаживание пульсаций полностью или частично идет за счет запасания энергии в виде вращающихся масс.

Так как мгновенная мощность многофазного тока меняется меньше, чем это имеет место при однофазном токе, а при бесконечно большом числе фаз мгновенная мощность совершенно не меняется, то и преобразование тока может идти чисто электрическим путем, без каких-либо органов, запасющих энергию. Иначе говоря, в этом случае сглаживающие приспособления могут быть весьма незначительны или даже совсем отсутствовать.

Преобразование переменного тока в постоянный механическим путем ясно без каких-либо особых пояснений.

Что касается самого важного, а именно электрического преобразования переменного тока в постоянный помощью вентиля, то независимо от громадного числа различных способов все они покоятся на следующих основаниях.

Для выпрямления необходимо, чтобы при прохождении тока в одном направлении, падение напряжения в выпрямляющем приборе, или вентиле, было

возможно мало, и при прохождении в другом направлении было возможно велико. Это падение может иметь омический характер, т. е. зависеть от силы тока ($e = IR$), или может не зависеть от тока, представляя как бы некоторую противоэлектродвижущую силу. Первого рода сопротивление имеется у кенотронов до их насыщения, второго же рода, с некоторым приближением, имеет место у ионных выпрямителей, каковы ртутные, газовые и т. д.

Для создания указанного выше весьма большого сопротивления, или падения, чаще всего пользуются различным падением на электродах, в зависимости от того, будет ли данный электрод катодом или анодом, как было сказано ранее в гл. I ч. I.

Это падение весьма различно. Для холодных электродов анодное падение вообще невелико, тогда как катодное составляет весьма значительную величину, поэтому для создания неравного падения при том и другом направлении тока и пользуются главным образом катодным падением, уменьшая его на одном из электродов, для чего имеется ряд средств, указанных в гл. III, IV, V ч. I. В числе наиболее часто используемых способов уменьшения катодного падения

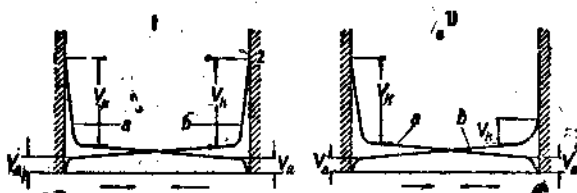


Рис. 26. Распределение падения между электродами при равных и неравных катодных падениях двух электродов.

применяется раскалывание катода и выбор того или другого материала его.

На рис. 26-I показано распределение падения между электродами при прохождении тока между электродами от электрода 1 к электроду 2 — кривая *a* и в обратном направлении — кривая *b*.

Из чертежа видно, что общее падение между электродами будет одно и то же при прохождении тока в том или другом направлении.

Если теперь мы уменьшим катодное падение электрода 2 каким-либо способом, то получим для различных направлений тока разные общие падения напряжения. При прохождении тока в направлении от электрода 1 к электроду 2 падение будет значительно больше, чем в обратном направлении.

Вследствие неравенства падений для токов различного направления, в приборе, отвечающем рис. 26-II, мы будем иметь вентильное действие, т. е. выпрямление. Из сказанного выше следует, что один из электродов играет наиболее существенную роль. Это тот электрод, у которого уменьшено *катодное* падение.

Применение того или другого принципа уменьшения катодного падения и той или другой системы выпрямления зависит как от величины выпрямленного напряжения, так и от силы выпрямленного тока или мощности установки и, наконец, от назначения выпрямителя.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ГАЗОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ.

1. Остриевые разрядники.

Прохождение тока через газ при больших давлениях используется в целях выпрямления в остриевом разряднике и синхронных механических выпрямителях высокого напряжения.

Остриевые разрядники для выпрямления собираются из двух асимметричных электродов; обычно в таких разрядниках против диска диаметром 10—20 см на расстоянии, определяемом величиной выпрямляемого напряжения, устанавливается цилиндрический стержень, заточенный на конце, обращенном к диску, на конус. Благодаря реакой неоднородности поля и большим значениям градиента у острия, здесь идет усиленная ионизация даже и тогда, когда в средней части и особенно у диска поле для этого еще недостаточно. При методе на острие начальное напряжение, т. е. то, при котором через газ начинают проходить значительные токи, лежит ниже, чем при обратном направлении тока. Отношение начальных напряжений X_+ и X_- в случае анода и соответственно катода на острие зависит от ряда условий опыта; некоторую роль играет угол конуса острия, материал, степень защищенности разрядного пространства от электрических влияний соседних проводов, расстояние между электродами и т. д. В таблице 16 даны значения X_+ и X_- и их отношение для разных углов конуса острия.

Таблица 16.

Угол	90°	60°	30°	15°
X_+	8500	6900	4600	4200
X_-	5900	4800	3200	3100
$\frac{X_+}{X_-}$	1,44	1,44	1,49	1,35

Природа газа мало сказывается на величине отношения $\frac{X_+}{X_-}$, значительно меняя абсолютные значения того и другого (таблица 17).

Таблица 17.¹

Газ	Давление 760 мм			Давление 485 мм		
	X_+	X_-	$\frac{X_+}{X_-}$	X_+	X	$\frac{X_+}{X_-}$
H_2	1,37	1,14	1,38	1,12	1,00	1,12
N_2	1,93	1,40	1,38	1,63	1,20	1,36
O_2	2,55	1,95	1,31	—	—	—
Воздух...	2,25	1,66	1,34	1,93	1,50	1,29
Cl_2	—	—	—	2,40	1,66	1,45

¹ Данные табл. 17 относятся к цилиндрическому конденсатору; размеры внутреннего и внешнего электродов: $d_{\text{внутр}} = 0,25$ мм, $d_{\text{внешн}} = 4,7$ см.

Сила тока через остревой разрядник определяется формулой:

$$I = \frac{2\pi d^2}{m-2} i_0 (1 - \cos^{m-2} \theta), \quad (29)$$

где

$$i_0 = \frac{ad}{d^m} V(V-M).$$

В этих формулах: d — расстояние между электродами, m — численный фактор, величина которого для катода на острье 4,65, для анода 4,82, θ — угол, образуемый краями острья с осью диска, a — постоянная порядка 10^{-12} А, M — начальное напряжение при заданных геометрических условиях разрядника.

Остриевые разрядники устанавливаются обычно для выпрямления тока высокого напряжения в рентгеновских установках; расстояние между электродами подбирается таким образом, чтобы при заданной величине переменного напряжения X_+ было больше, X_- меньше амплитудного значения; ток через газ проходит только в одном направлении — при катоде на острье. Эти выпрямители теперь почти совсем не употребляются, несмотря на всю их простоту.

Объясняется это невозможностью получить сколько-нибудь значительные токи; при увеличении силы тока разряд переходит в дугу, причем коэффициент выпрямления падает до нуля.

Довольно несложные видоизменения в описанном устройстве разрядника позволяют значительно улучшить его выпрямительные свойства. Остриевой стержень помещается в запаянную стеклянную трубку, как это показано на рис. 27; так же как

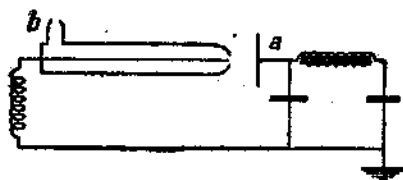


Рис. 27. Схематическое изображение остреного разрядника (выпрямителя) с дутьем.

и обычно, против острья располагается дисковый электрод a . Стеклянная трубка, в которую впаян боковой отрезок b , присоединяется посредством длинной резиновой трубки к нагнетательному насосу. Для выпрямления напряжения порядка 50—70 кВ диаметр диска берут равным 10—15 см, диаметр выходного отверстия для воздуха у острья должен быть порядка 3—4 мм, диаметр остреного электрода 1—2 мм, длина стеклянной трубки 10 см, расстояние между электродами 1,5—2 см.

Выпрямление здесь получается весьма совершенным, образование дуги затруднено сильной струей воздуха, так что можно пропустить через выпрямитель токи порядка десятков и сотен миллиампер. Эти выпрямители употребляются до 350 кВ, материалом для электрода могут служить алюминий, железо и некоторые другие металлы. Коэффициент отдачи таких выпрямителей довольно высок и может достигать 80—85%.

2. Синхронные выпрямители высокого напряжения.

Синхронные выпрямители высокого напряжения представляют по существу один из типов механических выпрямителей, и газовый разряд здесь используется просто как контакт без трения в выпрямляющей системе. Подобного типа выпрямители состоят из четырех подвижных сегментов, которые попарно соединены между собой (рис. 28а). Два противоположных неподвижных сегмента S_1 и S_2 соединяются с источником переменного тока высокого напря-

жения, которое должно быть выпрямлено. Крестообразно расположенные подвижные сегменты укреплены на валу синхронного двигателя, причем все они могут быть при регулировке работы выпрямителя повернуты на валу и прочно затем закреплены. Положение рамы на валу должно быть подобрано таким образом, чтобы совпадение середины каждого из подвижных сегментов с серединой неподвижных происходило при максимальном значении напряжения. Как не трудно видеть из рис. 28а, между сегментами S_2 и S_4 получается выпрямленный ток, прохождение которого осуществляется в этих выпрямителях через искру. Искровой разряд ведет к возникновению в цепи колебаний высокой частоты, для тушения которых употребляется самоиндукция L , включаемая между трансформатором и выпрямителем.

Существует ряд других типов подобных выпрямителей с разными схемами соединений неподвижных и подвижных сегментов.

Синхронные выпрямители употребляются чаще всего в рентгеновских установках; находят они себе большое приме-



Рис. 28а. Схема устройства синхронного выпрямителя высокого напряжения.

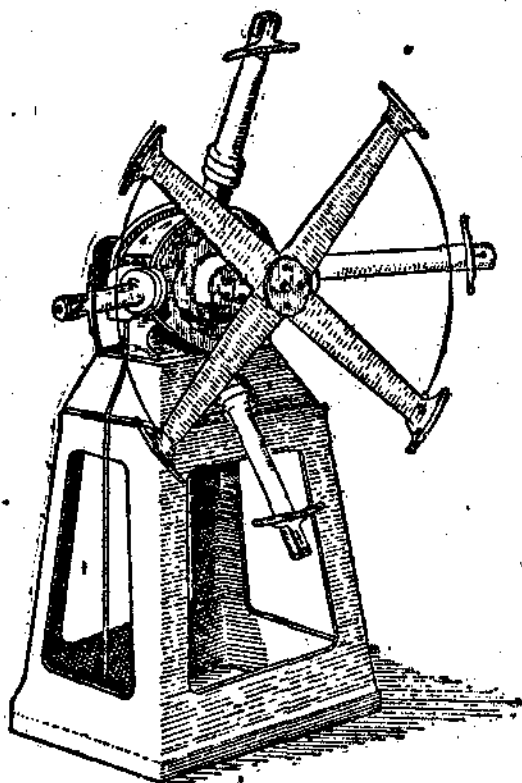


Рис. 28б. Общий вид синхронного выпрямителя высокой фирмы Сименс.

нение и в аппаратах Коттреля по электрическому обеспыливанию. Вообще же говоря, они хороши в тех случаях, когда приходится иметь дело с напряжениями до 200 кВ и большими токами; в этого рода выпрямителях без особых затруднений удастся получить токи в несколько десятых ампера. Падение напряжения в искре довольно значительно, от 5 до 15% выпрямленного напряжения; рациональное использование установки достигается только в случае очень высоких напряжений. Сложный уход за установкой, относительно большое падение напряжения в искре, колебания высокой частоты принадлежат к очень существенным недостаткам этих выпрямителей, и они почти везде теперь вытесняются более удобными в обращении кенотронными устройствами.

На рис. 28б показан общий вид синхронного выпрямителя фирмы Сименс.

ГЛАВА ВТОРАЯ. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ.

1. Системы выпрямителей.

Простейший случай выпрямления или превращения переменного тока в постоянный представляет коллекторная динамо-машина постоянного тока, где выпрямляющим органом служит коллектор, тогда как в самых катушках якоря индуктируется переменная э. д. с. и идет ток переменного направления. Если однако останавливаться на поставленной задаче с внешней стороны, то превращение переменного тока в постоянный механическим путем может быть произведено следующими приборами:

1) мотор-генератором, 2) одноякорным умформером, 3) трансвертером, 4) трансвертером с ионной коммутацией, 5) маятниковым или вибрационным коммутатором, 6) ртутным выпрямителем с ртутной струей.

2. Мотор-генератор.

Мотор-генератор состоит обычно из двигателя переменного тока и динамо постоянного тока, соединенных механически. Напряжения, получаемые от такого агрегата, совершенно независимы одно от другого, и постоянное напряжение может регулироваться в широких пределах без каких-либо специальных промежуточных аппаратов. Недостатком этой системы служит сравнительно низкая отдача и высокая стоимость. В случае синхронного мотора агрегат может служить для компенсации $\cos \varphi$ сети.

3. Одноякорный умформер.

Одноякорный умформер отличается тем, что здесь при выпрямлении электрическая энергия не превращается сперва в механическую, как в первом случае, а непосредственно коммутируется. Отсюда понятно, что выпрямленное напряжение будет связано с подводимым напряжением некоторым соотношением, зависящим от числа фаз подводимого тока. На рис. 29 показана схема трехфазного одноякорного умформера.

Если напряжение переменного тока, индуктируемое в обмотках, будет

$$e = E_m \sin \omega t, \quad (30)$$

то щетки должны быть установлены таким образом, чтобы к ним подходила такая часть обмотки, для которой будет иметь место фаза, отвечающая

$$\omega t = \frac{\pi}{2},$$

когда

$$e = E_m.$$

Таким образом напряжение постоянного тока будет

$$E_c = E_m.$$

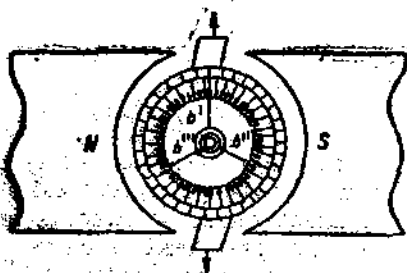


Рис. 29. Схема одноякорного трехфазного умформера.

Эффективное значение подводимого напряжения переменного тока будет

$$E_{\text{эф}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (31)$$

и отношение между напряжением подводимого переменного тока и напряжением выпрямленного тока будет равно:

$$\frac{E_{\text{эф}}}{E_g} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (32)$$

В таблице 18 даны соотношения для различного числа фаз при синусоидальном токе и $\cos \varphi = 1$.

Таблица 18.

Напряжение постоянного тока	Эффективное значение напряжения переменного тока при числе фаз:					
	1	2	3	6	12	m
100	70,7	70,7	61,2	35,4	18,3	$\frac{100}{\sqrt{2}} \cdot \sin \frac{\pi}{m}$

Для получения нужного выпрямленного напряжения здесь необходимо применение промежуточного трансформатора, что удорожает установку и делает невозможной плавную регулировку.

Что касается тока, проходящего через якорь одноякорного умформера, то из чертежа нетрудно видеть, что выпрямленный ток имеет форму D , показанную на рис. 30 для однофазного тока, а подводимый — синусоидальную форму, обозначенную через A на том же чертеже. Разность этих токов создает ускоряющие и замедляющие моменты, ведущие к качаниям якоря около синхронной скорости, которые должны гаситься соответствующими демпферами. В виду сказанного в якоре создаются добавочные потери, зависящие от числа фаз и быстро падающие с увеличением их. В таблице 19 приведены соотношения между мощностью постоянного тока, которая может быть взята от умформера, к той мощности, которая могла бы быть получена от того же якоря, при работе его якорем машины постоянного тока. Данные относятся к синусоидальному току и $\cos \varphi = 1$.

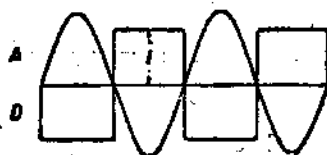


Рис. 30. Форма кривых пост. и пер. тока, проходящего через якорь однофазного умформера.

Таблица 19.

Мощность постоянного тока	Мощность умформера при числе фаз:					
	2	3	4	6	12	∞
100	85	134	164	196	224	231

Таблица составлена в том предположении, что потери в якоре в том и другом случае будут одинаковы, и показывает, что лишь при большом числе фаз получается установка небольших размеров.

Пуск в ход одноякорного умформера встречает затруднения. Он может осуществляться путем вспомогательного двигателя или путем снабжения умформера понижающим трансформатором. Отдача умформера сильно зависит от нагрузки, как это видно на кривых рис. 31.

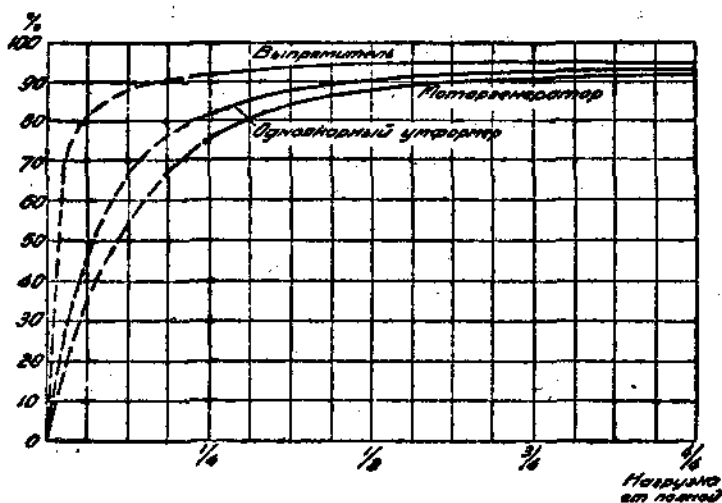


Рис. 31. К. п. д. вращающихся преобразователей и выпрямителя.

Кроме одноякорного умформера может быть применен для выпрямления каскадный умформер. Он имеет преимущества перед одноякорным преобразователем: во-первых независимость выпрямленного напряжения от напряжения переменного тока и во-вторых более легкий пуск.

4. Трансвертер.

С одноякорным умформером сходен трансвертер, в котором вращаются щетки, тогда как обмотки якоря и коллектор неподвижны. Конструктивно трансвертер осуществляется путем применения нескольких трехфазных трансформаторов, сдвинутых по фазе на некоторый угол. Концы трехфазных систем присоединены к неподвижным коллекторным пластинам неподвижного коммутатора, по которому движутся подвижные щетки, вращаемые синхронным двигателем. В трансвертере имеется ряд таких коммутаторов, щетки которых включены последовательно. Благодаря возможности осуществ-

ления изоляции неподвижных коммутаторов и трансформаторов на весьма высокие напряжения, трансвертер может быть построен на напряжения выше 100 000 вольт. Этого рода машина обратима, т. е. может служить и для превращения постоянного тока в переменный. На рис. 32 дана схема трансвертера. С трансвертером сходная система, предложенная автором и выполненная в ЦРЛ треста „Электросвязь“.

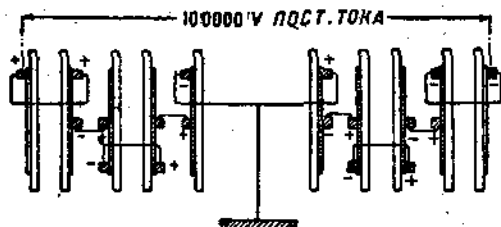


Рис. 32. Схема трансвертера.

ствления изоляции неподвижных коммутаторов и трансформаторов на весьма высокие напряжения, трансвертер может быть построен на напряжения выше 100 000 вольт. Этого рода машина обратима, т. е. может служить и для превращения постоянного тока в переменный. На рис. 32 дана схема трансвертера. С трансвертером сходная система, предложенная автором и выполненная в ЦРЛ треста „Электросвязь“.

5. Трансвертер с ионной коммутацией.

Так как коммутация в трансвертере представляет затруднения, требуя большого числа коллекторных пластин, то автором было предложено самую коммутацию вести ионным путем, как это и имеет место в обычных выпрямителях, описанных ниже. В этом случае не приходится бояться искрообразования и возможно ограничиться весьма небольшим числом коллекторных пластин в каждом каскаде, несмотря на весьма высокие напряжения каждого каскада. Прибор в этом случае состоит в простейшем виде из 3-или 6-фазного трансформатора, вторичные обмотки которого присоединены к пластинам вращающегося коммутатора, по которому скользят щетки в количестве двух; к этим щеткам приключены аноды выпрямителя, катоды которого соединены вместе или представляют один общий ртутный катод. Между катодом и средней точкой трансформатора включена полезная нагрузка, питаемая выпрямленным током, рис. 33.

Коммутатор вращается с помощью синхронного мотора, приводимого в действие от того же источника переменного тока, который питает и трансформатор выпрямительного устройства. Действие прибора заключается в следующем: в момент времени, когда напряжение первой фазы имеет положительное значение, превосходящее по своей величине такие же значения других фаз, пластина коммутатора 1, отвечающая первой фазе, касается щетки, соединенной с одним из анодов. При приближении момента времени, при котором напряжение второй фазы делается равным напряжению первой фазы, щетка 2', соединенная со вторым анодом, или анодом второго выпрямителя, приходит в соприкосновение с пластиной коммутатора 2, соединенной со второй фазой трансформатора. Это соединение осуществляется несколько ранее того момента, когда наступает равное напряжение 1-ой и 2-ой фаз. Таким образом некоторое время как первая, так и вторая фаза будут приключены, каждая при посредстве своего выпрямителя, к цепи приемника выпрямительного тока. Ток согласно положению, высказанному нами далее в гл. II, 33, ч. III, пойдет сперва по первому выпрямителю, затем переключится на второй выпрямитель. В последнем случае выпрямление будет производиться уже второй фазой трансформатора. После этого момента щетка 1' не будет уже касаться пластины коммутатора, соединенной с первой фазой, и период коммутатора будет завершен. С первого взгляда можно было бы думать, что здесь коммутация идет так же, как и в коллекторных выпрямителях или в нормальном трансвертере. Однако при более внимательном рассмотрении можно видеть, что коммутация здесь идет не принудительно, а чисто ионным путем, как это происходит в обычных выпрямителях, в результате чего щетки покидают коммутатор и дают контакт с коммутатором в то время, когда ток через данную щетку имеет значение равное нулю, причем это значение сохраняется в течение некоторого времени после выключения коммутаторной пластины на щетку. Вследствие этого между щетками и пластинами коммутатора не будет искр, даже при весьма высоких выпрямленных напряжениях, достигающих 10 000 вольт.

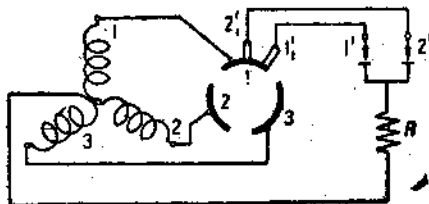


Рис. 33. Схема трансвертера с ионной коммутацией.

Этот механизм можно рассматривать несколько с другой точки зрения, а

именно как включение в период коммутации, в цепь щетки, вентиля, препятствующих возникновению токов короткого замыкания.

На рис. 34 показан общий вид вращающегося коммутатора такого рода выпрямительного устройства.

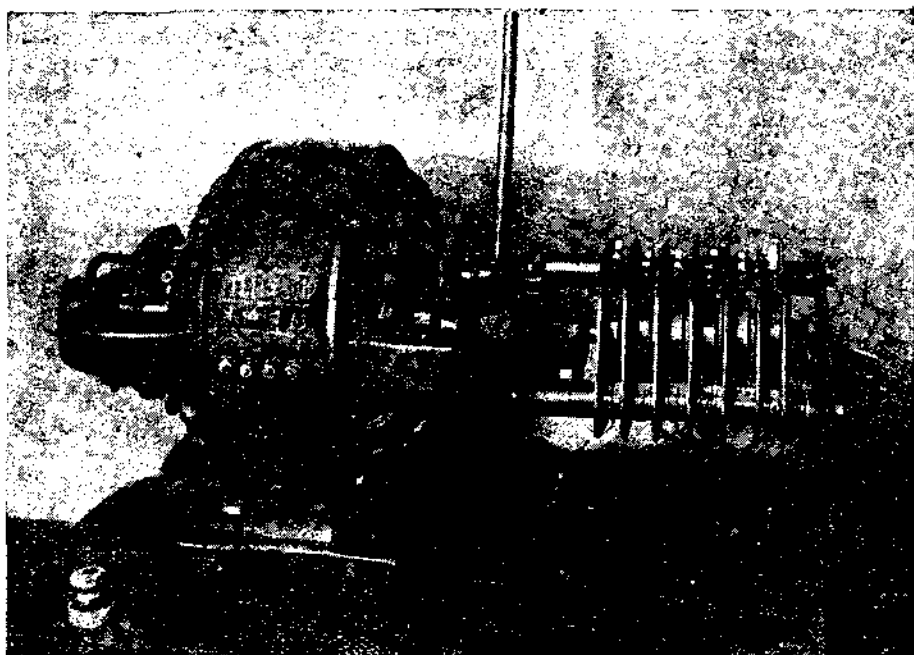


Рис. 34. Общий вид вращающегося коммутатора трансвертера с нонной коммутацией.

6. Выпрямитель со ртутной струей.

Особое место среди мощных выпрямителей механического характера занимает выпрямитель с ртутной струей системы проф. Хартманна (Hartmann) в Копенгагене. Этот выпрямитель был построен на 400 ампер при 250 вольтах выпрямленного напряжения. Данные его опубликованы всего лишь в 1927 г., хотя он и начат разработкой уже 20 лет тому назад. До сих пор он был выполнен лишь в виде опытной модели. На рис. 35 показана схема прибора этого рода. Здесь ртутная струя, диаметром около 3,8 мм, вытекает из сопла R и движется между полюсами O сильного электромагнита, питаемого постоянным током, до прикосновения к вспомогательному электроду E . Электроды R и E присоединены к обмотке вспомогательного низковольтного трансформатора V_a , почему по струе идет сильный переменный ток. Взаимодействие между переменным током, идущим по жидкому проводнику и постоянным полем, вызывает отклонение струи в ту или другую сторону, в такт с частотой тока вспомогательного трансформатора V_a . Пройдя вспомогательный электрод E , ртутная струя описывает волнообразную кривую и при этом может касаться электродов E_1 или E_2 , которые присоединены к концам обмотки рабочего трансформатора. Электрод E соединен с приемником выпрямленного тока, тогда как середина рабочего трансформатора соединена с другим полюсом при-

емника. Основная трудность устройства состоит в избежании соединения между электродами E_1 и E_2 в момент коммутации, для каковой цели применен нож p , который должен разрезать струю ртути. Этот нож выполнен из вольфрама. Поднятие его вверх может уменьшить время касания струн к каждому из электродов, тогда как в случае нахождения ножа в плоскости электродов время прохождения тока по каж-

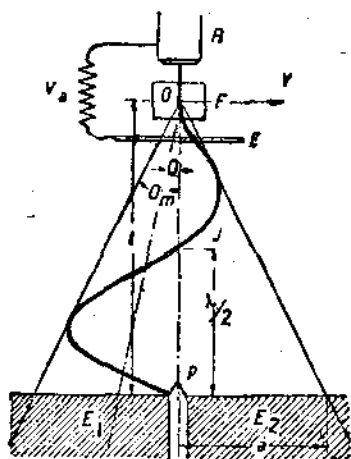


Рис. 35. Схема устройства выпрямителя системы проф. Хартманна с ртутной струей.

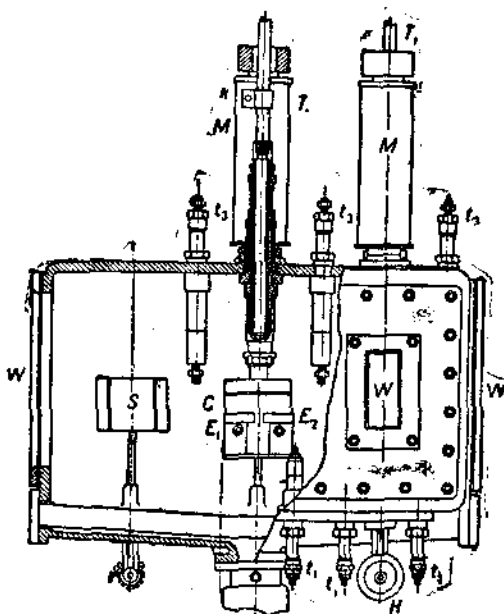


Рис. 36. Общий вид и разрез выпрямителя Хартманна.

дому из контактов приблизительно равно половине периода. Для получения многофазного выпрямления необходимо устройство ряда струй. С увеличением мощности устройство усложняется установкой нескольких вспомогательных ножей. На рис. 36 показан разрез такого устройства на мощность в 100 киловатт.

Основные данные устройства: 100 киловатт, 250 вольт; диаметр струи — 3,8 мм; высота устройства — 1,75 м; число струй — 6; постоянные потери — 1,6%; переменные потери — 8,5%. На рис. 37 дана кривая к. п. д. выпрямителя 100 киловатт 250 вольт.

Если выпрямитель Хартманна не представляет большого интереса для средних и высоких напряжений (110 — 500 вольт и 500 — 2000 вольт), так как для этих напряжений имеется ряд систем, достаточно хорошо разработанных, то эта система представляет интерес для низких напряжений, порядка десятков вольт. Для этих напряжений вакуумные выпрямители не могут дать достаточно высокого к. п. д. в виду наименьшего падения в них, около 15 вольт. Механическое выпрямление в свою очередь встречает затруднения при увеличении силы тока до нескольких сот ампер. Выпрямитель со ртутной струей может

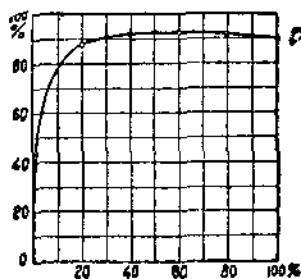


Рис. 37. К. п. д. выпрямителя Хартманна.

заполнить тот пробел, который существует здесь если, принять во внимание, что сопротивление струи может составить всего лишь 0,0001 ома. В этом случае, при выпрямлении тока в 5000 ампер, получим падение всего лишь в 0,4 вольта, и уже при незначительных выпрямленных напряжениях возможно получение достаточно высоких коэффициентов полезного действия.

7. Механические выпрямители малой-мощности (вибрационные).

Для целей зарядки аккумуляторов низкого напряжения могут применяться выпрямители, в которых выпрямление производится вибрирующим якорем, дающим контакт то с одной стороны, то с другой. Число этих включений должно соответствовать частоте выпрямляемого тока и должно кроме того производиться тогда, когда выпрямляемый ток имеет нулевое значение. На первый взгляд кажется, что выполнение последнего условия не представляет затруднений, однако на самом деле это не так. Разрыв контакта уже при самом незначительном токе ведет к образованию искр и быстрому разрушению контакта. Для выяснения работы выпрямителя рассмотрим диаграмму, отвечающую механическим колебаниям упругого якоря. На рис. 38 видно, что для механической колебательной системы, каковой является якорь выпрямителя, отклонение O и скорость S будут на-

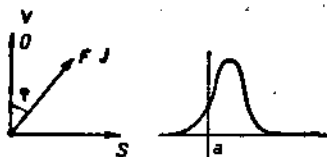


Рис. 38. Диаграмма работы вибрационного выпрямителя.

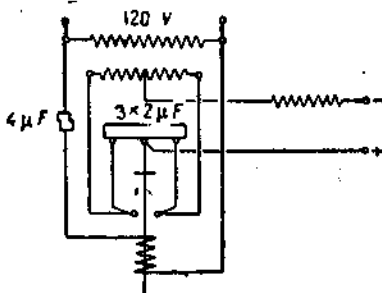


Рис. 39. Схема вибрационного выпрямителя фирмы Hydrowerke.

ходиться в квадратуре. Если система не будет в резонансе, то сила F , заставляющая якорь колебаться, будет в фазе с отклонением; с другой стороны сила F всегда в фазе с током I , проходящим по катушке. Если индуктивность катушки мала, то ток будет в фазе и с напряжением V .

Однако при работе механической системы не в резонанс с импульсами, которые будут заставлять ее колебаться, отклонения якоря будут слишком малы для того, чтобы выпрямление шло устойчиво, почему и приходится работать вблизи резонанса; в этом случае однако сила F , отклоняющая якорь и производимая катушкой, должна быть близка по фазе к скорости S . Отсюда следует, что и ток, проходящий по катушке, должен быть не в фазе с напряжением, а опережать его на некоторый угол φ , как это и показано на рис. 38. Опережающий ток создается путем включения в цепь намагничивающей катушки емкости, как это показано на рис. 39, дающем схему выпрямителя Hydrowerke. Если фаза тока будет подобрана в соответствии с той точкой резонансной кривой, на которой при данной частоте сети будет работать якорь, то возможно осуществление работы без искр, так как разрывы будут при нулевом токе. Однако уже небольшое отклонение частоты питающей сети поведет за собой расстройство механической системы и нарушение требуемых диаграммой рис. 38 соотношений, почему при этом выключение будет происхо-

дять уже не при нулевом токе, вследствие чего появится сильное искрообразование. Чем ближе к резонансу будет работать механическая система, тем чувствительнее будет выпрямитель к изменениям частоты сети.

8. К. п. д. вибрационного выпрямителя.

Нулевое значение выпрямленного тока может иметь место лишь при отсутствии в цепи выпрямленного тока индуктивности, почему работа механического выпрямителя и не допускает применения реактивной катушки при зарядке аккумуляторов. Отсутствие сглаживания выпрямленного тока реактивной катушкой сильно понижает отдачу устройства по следующим соображениям: а) для зарядки аккумуляторов полезной будет лишь постоянная составляющая; б) переменная составляющая образует полностью потери в аккумуляторах; в) переменная составляющая при 100%-ных пульсациях составляет около 70% от постоянной составляющей. Отсюда видно, что теоретический коэффициент полезного действия механического выпрямителя будет равен

$$\eta = \frac{i_g}{i_g + i_w} = \frac{1}{1,7} \cong 58\% \quad (33)$$

В действительности к. п. д. не достигает 50%, несмотря на то, что в самом выпрямителе потери незначительны.

Конструктивное устройство механических выпрямителей покажем на примере нескольких систем.

9. Выпрямитель типа GR Hydrawerke.

Этот выпрямитель изображен на рис. 40. Он состоит из якоря, снабженного тонкими пружинами f_1 и f_2 , несущими контакты, катушки S , питаемой током сети, и постоянного магнита M с полюсными наконечниками a_1 и a_2 . Из устройства видно, что выпрямитель представляет собою поляризованную систему. Контакты k_1 и k_2 присоединены к концам трансформатора. Схема включения была приведена на рис. 39. Роль пружин f_1 и f_2 заключается в том, чтобы дать возможность якорю свободно колебаться. Выпрямитель строится для зарядки двух или четырех свинцовых аккумуляторов на 2 ампера, для включения в сеть с напряжением от 100 до 140 вольт и от 200 до 250 вольт. Коэффициент полезного действия около 50%.

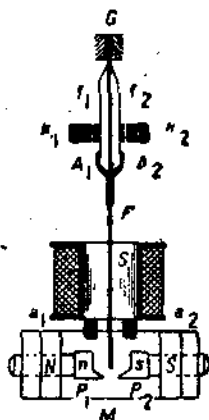


Рис. 40. Устройство вибрационного выпрямителя фирмы Hydrawerke.

10. Выпрямитель системы Falkenthal и Koch.

Этот выпрямитель отличается тем, что якорь вращается на неподвижной оси. Системы также поляризованы. В первом выпрямителе контакты угольные, поверхность около 0,5 см². Они быстро прирабатываются и могут быть сменяемы. В выпрямителях Коха тщательно компенсирована инерция системы и самоиндукция, почему прибор может быть построен на большие силы тока; фирмой строятся выпрямители для зарядки 60 элементов при 15 амперах, а также до 500 ампер для зарядки микрофонных аккумуляторов и на 100 ампер для гальванопластических цепей.

11. Выпрямитель Tellor.

В этом выпрямителе главное внимание обращено на меньшую зависимость прибора от изменений частоты сети, питающей выпрямитель, для чего применены две колебательных системы, из которых одна работает по одну сторону резонанса, а другая по другую. Этим достигается при достаточно

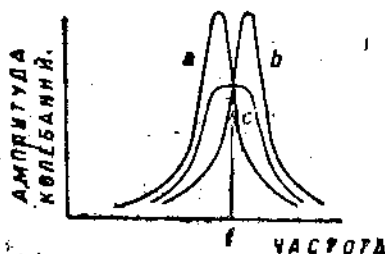


Рис. 41а. Диаграмма работы вибрационного выпрямителя фирмы Tellor.

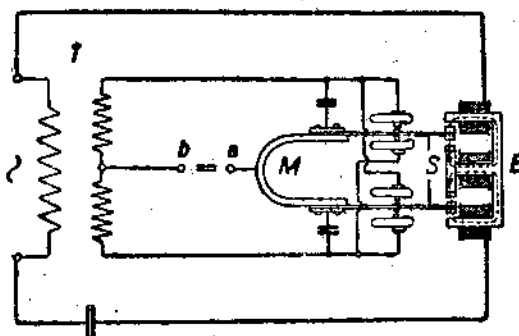


Рис. 41б. Схема вибрационного выпрямителя фирмы Tellor.

больших размахах якорей уширенная резонансная кривая. На рис. 41 а и б показана как схема, так и конструкция выпрямителя. Этот выпрямитель может работать, по данным автора, при колебаниях частоты в пределах от 46 до 54 периодов, без подрегулирования и искрения, при зарядке батарей накала 4,6 и 12 вольт, а также анодных батарей 30 и 120 вольт. Выпрямитель Tellor изготовляется германской фирмой Fritze в Дрездене.

12. Газовое пламя как выпрямитель

Для выпрямления высоких напряжений, при малых силах токов, порядка десятков миллиампер, в качестве выпрямителя может быть применено газовое

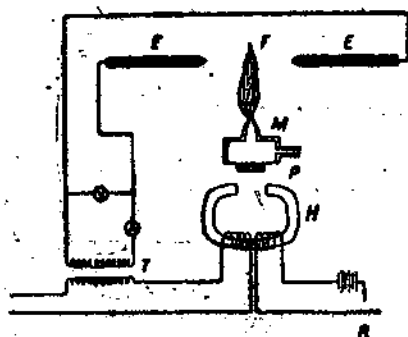


Рис. 42. Схема выпрямителя с газовым пламенем системы Доулинг и Гаррис.

пламя, как заключающее в себе большое количество отрицательных ионов. Замыкание помощью пламени производится путем изменений длины пламени, помещенного между электродами, соединенными с трансформатором, ток которого выпрямляется. Самое изменение длины пламени происходит синхронно с частотой сети, изменением давления в манометрической капсуле, мембрана которой колеблется вследствие притяжения ее электромагнитом. На рис. 42 дана схема устройства, усовершенствованного Доулингом и Гаррисом (I. I. Dowling и I. T. Harris). Данные устройства: объем капсулы — 2 см³, трубки — 1 см³; диаметр резиновой мембраны 3 см; высота пламени меняется от 1 до 10 см; напряжение выпрямленного тока 6000 V при 20 миллиамперах.

метр резиновой мембраны 3 см; высота пламени меняется от 1 до 10 см; напряжение выпрямленного тока 6000 V при 20 миллиамперах.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ВЫПРЯМИТЕЛИ С ГАЗОМ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ.

1. Выпрямители с тлеющим разрядом.

Наиболее простой газовый выпрямитель с пониженным давлением вполне аналогичен по принципу действия остриевому разряднику. Вентильная трубка для выпрямления токов высокого напряжения (обычно питающих рентгеновские установки) представлена на рис. 43, из которого ясно ее устройство и направление выпрямления. Для увеличения пропускной способности выпрямителя соединяют параллельно несколько таких вентилях. Эти выпрямители обладают многими преимуществами по сравнению с остриевыми разрядниками: замкнутый сосуд позволяет избежать неприятного действия озона и азотистых соединений, образующихся при разряде, они более компактны и удобны в обращении.

Во всех других газовых выпрямителях, работающих при низких давлениях, используется различие катодных падений потенциала для разных направлений тока. Как было выяснено выше, катодные падения потенциала различны для разных металлов и определяются величиной поверхности, сильно возрастающая в том случае, когда вся поверхность электрода покрывается свечением.

Оба эти обстоятельства используются при конструкции выпрямителей с тлеющим разрядом. Электрод с большой поверхностью делается из металла, у которого нормальное катодное падение потенциала мало, электрод с малой поверхностью делается из металла с большим падением потенциала. При наложении напряжения на такой вентиль падение напряжения внутри выпрямителя в том случае, когда минус оказывается на большом электроде, мало, в обратном же направлении — велико и может быть сделано равным приложенному; ток через систему лучше проходит при минусе на большом электроде. Для напряжений в 120 вольт распространены вентили с большим калиевым и очень малым железным электродами. Нормальное падение напряжения на калие около 80 вольт, в обратном направлении оно равно приложенному; включенный последовательно в цепь переменного тока на 120 вольт такой вентиль позволяет использовать 40 вольт постоянного тока при нагрузке в 0,2 ампера; этого рода вентиль используется обычно для зарядки радио-батарей.

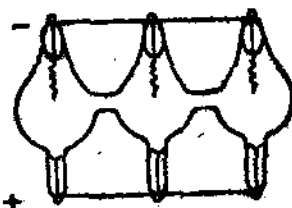


Рис. 43. Тройная вентильная трубка с пониженным давлением газа.

2. Выпрямители Osram и GEC.

Фирмы (Osram Осрам) в Германии и GEC в Америке строят вентили с тлеющим разрядом на 220 и 120 вольт; стеклянные баллоны вентилях наполняются смесью неона и гелия при давлении в 10 мм; в выпрямителях на 220 вольт оба электрода (цилиндр и проволока) железные, но разной поверхности; на 110 вольт большой электрод делается из сплава натрия с калием, жидкого при комнатной температуре.

Характеристика этих выпрямителей представляется формулой:

$$i = \frac{e - e_0}{\frac{1}{AM} + R}, \quad (34)$$

где i и e мгновенные значения силы тока и напряжения, e_g — критическое напряжение, при котором начинается разряд, R — внешнее сопротивление цепи и, наконец, AM — константа данного выпрямителя; величина ее различна для разных направлений тока. Для неоновых выпрямителей Г. В. С:

$$e_g = 150 - 170 \text{ вольт,}$$

$$\frac{1}{A_s M} = 180 - 160,$$

$$\frac{1}{A_s M} = 1 \times 10^4 \text{ до } 3 \times 10^4.$$

A_s относится к случаю, когда анод оказывается на цилиндре, A_s — когда анод оказывается на проволоке. Сила тока, проходящего через выпрямитель, представлена на рис. 44; лампа загорается в θ_a и горит до $(\pi - \theta_a)$ за первую полуволну, за вторую полуволну ток начинается в момент $(\pi + \theta_a)$ и прерывается в $(2\pi - \theta_a)$.

Угол θ_a определяется из равенства:

$$\theta_a = \sin^{-1} \frac{e_g}{E}. \quad (35)$$

Пользуясь уравнением

$$i = \frac{e - e_g}{\frac{1}{AM} + R}, \quad (36)$$

Рис. 44. Кривая тока, проходящего через выпрямитель с тлеющим разрядом.

нетрудно подсчитать среднее значение тока через выпрямитель.

В ту полуволну напряжения, когда вентиль пропускает большие токи, справедливо равенство:

$$\begin{aligned} i_M &= \frac{1}{\frac{1}{A_s M} + R} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_a}^{\pi - \theta_a} (E \sin \theta - e_g) d\theta = \frac{1}{A_s M + R} \left\{ \frac{E \cos \theta_a}{\pi} - e_g \left(\frac{1}{2} - \frac{\theta_a}{\pi} \right) \right\} = \\ &= \frac{\delta}{\frac{1}{A_s M} + R}. \end{aligned} \quad (37)$$

Аналогичное выражение можно написать и для другой полуволны:

$$i_{M'} = \frac{\delta}{\frac{1}{A_s M} + R}.$$

Результирующее значение выпрямленного среднего тока будет:

$$i_M = i_{M'} = \delta \left\{ \frac{1}{\frac{1}{A_s M} + R} - \frac{1}{\frac{1}{A_s M} + R} \right\}. \quad (38)$$

Величина δ зависит от величины приложенного напряжения и значения критического потенциала. На рис. 45 даны значения δ в зависимости от обеих указанных величин.

Эффективные значения тока через выпрямитель представляются формулой:

$$I = V \sqrt{2} \beta \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{A_p M} + R\right)^2} + \frac{1}{\left(\frac{1}{A_p M} + R\right)^2}} \quad (39)$$

или проще (пренебрегая вторым членом подкоренного выражения)

$$I = \frac{V \sqrt{2} \beta}{\frac{1}{A_p M} + R} \quad (40)$$

β в этих формулах (т. е. (39) и (40)) определяется соотношением:

$$\beta^2 = \frac{E^2}{4} \left(\frac{1}{2} \frac{\theta_a}{\pi} + \frac{\sin 2\theta_a}{2\pi} \right).$$

Коэффициент полезного действия неоновых выпрямителей очень низок из-за большого падения в приборе.

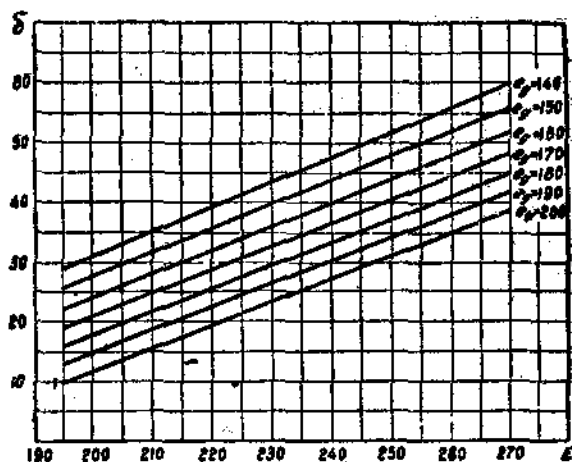


Рис. 45. Зависимость величины β от приложенного напряжения E при различных критических потенциалах ϵ_g .

3. Газовые выпрямители с накалившимся катодом.

На принципе разных падений потенциала строятся выпрямители, наполненные газом, с калящимся электродом. Нагревание последнего сопровождается выделением электронов, и вместе с тем очень малым падением потенциала в выпрямителях для того направления тока, когда этот электрод оказывается катодом. К такого рода выпрямителям относятся выпрямители: Ramar, Tungar, Rectignon (последний фирмы Westinghouse) и выпрямители Венельта (Wehnelt). Характеристики этих выпрямителей сопоставлены в таблице.

Таблица 20.

Выпрямитель	Давление газа мм	Ток А	Напряжение В
Tungar	30	3—6	10
Ramar	0,1	3—1	100—10000

В Tungar-и Ramar- выпрямителях калящийся электрод делается из вольфрама, трубка наполняется аргонем при довольно большом давлении (несколько сантиметров ртутного столба).

Выбор надлежащего давления газа представляет наиболее существенный вопрос при конструкции этих выпрямителей. При малых давлениях ионы образующиеся

в разрядном пространстве в результате ионизации не способны вызвать уменьшения объемного заряда обусловленного раскаленной нитью, при больших же давлении нить быстро разрушается от интенсивной бомбардировки.

Выпрямители рассматриваемого типа монтируются вместе с трансформатором и железным балластным сопротивлением, включенным последовательно в цепь вентиля. Необходимость этого сопротивления ясна из следующих соображений. Для того, чтобы в вентиле возник разряд, необходимо создать между его электродами напряжение, несколько превышающее потенциал ионизации заполняющего вентиль газа (в случае неона этот потенциал 16 вольт); для поддержания разряда можно ограничиться и меньшим напряжением, анодное падение потенциала при работе будет меньше ионизационного потенциала, оно достигает в рассматриваемого рода приборах 6—7 вольт. Величина железного сопротивления подбирается таким образом, чтобы при пуске в работу выпрямительного устройства падение потенциала на вентиле было достаточным для зажигания; когда через выпрямитель начинают проходить значительные токи, железная проволока разогревается, ее сопротивление увеличивается, и падение потенциала на вентиле уменьшается. Схема соединений в выпрямителе фирмы Филипс (Philips) Tungar приведена на рис. 46; на рис. 47 приведена характеристика балластного сопротивления этого выпрямителя; последний рисунок показывает, что сопротивление автоматически регулирует силу выпрямленного тока до практически постоянного значения.

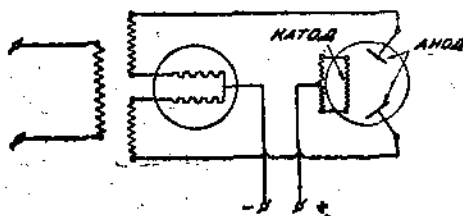


Рис. 46. Схема включения выпрямителя Tungar.

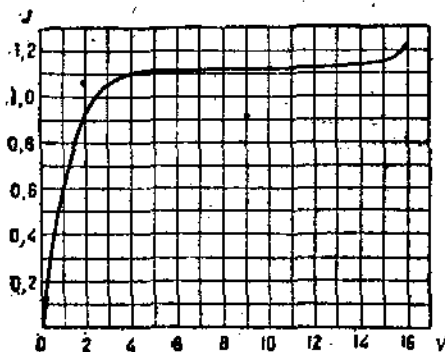


Рис. 47. Характеристика балластного сопротивления выпрямителя Tungar.

Ramag-Tungar- и Rectignon-выпрямители употребляются обычно для зарядки аккумулятора, и так как падение потенциала в них не зависит от нагрузки, то легко подсчитать среднюю силу выпрямленного тока, если известны все постоянные данного вентиль и цепи.

4. Средняя сила тока газового выпрямителя.

Пусть e_a — внутреннее падение потенциала, e_o — встречная электродвижущая сила в цепи постоянного тока, R — сопротивление той же цепи, E_m — амплитуда напряжения переменного тока. В виду того, что в цепи отсутствует самоиндукция, можно написать:

$$E_m \sin \theta - e_o - e_a - iR = 0.$$

Обозначая через e сумму $e_a + e_o$, т. е.

$$e = e_a + e_o$$

и замечая, что

$$\sin \theta_a = \frac{e}{E_m},$$

имеем:

$$i = \frac{E_m \sin \theta - e}{R}$$

и

$$i_M = \frac{1}{2} \pi \int_{\theta_a}^{\pi - \theta_a} \frac{E_m \sin \theta - e}{R} d\theta,$$

или

$$i_M = \frac{1}{2\pi R} \{ 2E_m \cos \theta_a - \pi e + 2e \theta_a \} \quad (41)$$

Для $e_0 = 11$ вольт, $E_m = 37,7$ вольт получим следующие (табл. 21) значения силы тока в зависимости от величины встречной электродвижущей силы, при R равному 1 ому. Данные относятся к выпрямителю Rectignon для случая зарядки последовательно соединенных свинцовых аккумуляторов, напряжение каждого из которых равно 2,2 вольта.

ТАБЛИЦА 21.

i_M	e_0	i_M	e_0
4,4	32	13,2	15
8,8	26	17,6	0

5. Выпрямитель с катодом Венельта.

Выпрямители Венельта (Wehnelt'a), построенные на том же принципе, что Tunngar и другие, гораздо шире употребляются в технике.

Наиболее существенная часть этих выпрямителей — калящийся катод, устройство которого приведено на рис. 48. На улиткообразном иридиевом проводнике a , покрытом слоем щелочно-земельных окислов, покоится массивный стержень b из того же активного материала. Стержень заключен в трубку c и может перемещаться в ней в осевом направлении. Проводник лежит на опорах из тугоплавного оксида d . Через вводы e, a, f ток накаливает спираль до желтого каления; при этой температуре металл, покрытый щелочно-земельными оксидами, излучает большое число электронов, вызывающих ионизацию в пространстве между электродами. В процессе работы выпрямителя стержень разогревается и соль возгоняется на спираль, поддерживая все время активной поверхность иридия. В таблице 22 приведены значения тока насыщения для ряда температур и разных активизирующих масс.



Рис. 48.
Устройство
катода Ве-
дельта.

¹ Наличие этих окислов на поверхности металлов сильно увеличивает электронную эмиссию.

ТАБЛИЦА 22.

ТОК НАСЫЩЕНИЯ В 10^{-8} А/СМ² ДЛЯ НАКАЛИВАЕМЫХ ОКСИДОВ.

Оксиды	800°	900°	1000°	1100°
CaO	6,94	183	2840	—
BaO	2,10	63,6	1080	—
SrO	0,11	4,2	86,9	1183

Выпрямители Венельта строятся на высокие и низкие напряжения. Последнего типа трубки до напряжения в 200 вольт допускают нагрузки в 1, 2, 3, 6, 10, 20 и 50 ампер.

Колбы выпрямителя Венельта наполнены аргоном при давлении в несколько миллиметров. Срок жизни выпрямителей около 800 часов; порча их вызывается с одной стороны испарением активных масс с катода, с другой — изменением давления и состава газа.

Коэффициент полезного действия выпрямителя Венельта определяется по преимуществу анодным падением потенциала, в противоположность выпрямителям с тлеющим разрядом, где фактически все внутреннее падение приходится на долю катода. Исследования трубки Венельта показали, что катодное падение здесь около 3 вольт, падение в разрядной области 2 вольта, и анодное в аргоне 12, в неоне 18 вольт (ионизационные потенциалы соответствующих газов).

Полное падение потенциала при наполнении аргоном таким образом 17 вольт, при наполнении неоне 23 вольта; от силы выпрямленного тока это падение не зависит, чего и следовало ожидать из общей теории тлеющего разряда. Выпрямители на высокое напряжение наполняются чистым неоне под небольшим давлением в несколько десятых миллиметра. Стеклообразные отводы у анода при для затруднения образования разряда в непроводящем ток направлении.

Рис. 49. Регенератор Бауэра для выпрямителя Венельта.

Регенератор Бауэра для выпрямителя Венельта.

Очень часто выпрямители Венельта на высокое напряжение снабжаются регенераторами Бауэра (Bauer), позволяющими в случае надобности восполнить убыль газа, поглощенного электродами при разряде; в высоковольтных выпрямителях убыль газа — основная причина порчи вентиля. Регулятор Бауэра представлен на рис. 49 и состоит из закрытого ртутного вентиля, в котором находится пористая глиняная пластинка. Посредством резиновой груши легко можно повысить давление в центральной трубке вентильного устройства, и впустить в баллон лампы через фаянсовую пластинку необходимое количество воздуха.

6. Выпрямители с затрудненным газовым разрядом.

В ряде случаев газовый разряд используется для выпрямления в приборах, работающих на принципах, резко отличных от только что рассмотренных. Впервые Буш и Смит, а далее М. Ситников воспользовались для целей вы-

прямления затрудненным газовым разрядом. В случае малых расстояний между электродами и малых давлений газа разряд в трубке не возникает. Причина этого явления заключается в том, что электроны, двигаясь в междуэлектродном пространстве, не встречают на своем пути ни одной молекулы газа; длина силовых линий, по которым движутся заряды, меньше длины свободного пути электрона в газе при заданном давлении. Как бы высоко мы ни поднимали напряжение на электродах, как бы сильно мы ни увеличивали тем самым энергию электрона, он не сможет произвести ионизации, т. к. проходит весь путь между электродами без столкновения и проводимость трубки оказывается крайне малой. Увеличение расстояния между электродами до значения длины свободного пути электрона вызывает резкое увеличение силы тока в трубке, в газе начинается ионизация. На принципе сравнимости расстояния между электродами и длины свободного пути строятся выпрямители с магнитным и объемным контролем.

7. Выпрямители с магнитным контролем.

В первых из них за одну полуволну выпрямляемого напряжения траектория электрона искусственно удлиняется магнитным полем, и трубка делается таким образом для одного из направлений тока проводящей, устройство вторых будет пояснено ниже.

Длина свободного пути электрона (см. ч. I, гл. II, 17) в газе определяется соотношением:

$$e = 4\sqrt{2} \times 700 \frac{L}{p}, \quad (42)$$

где L — характеристика для газа постоянная (табл. 23), p — давление.

Таблица 23.

Газ	L	Газ	L
Гелий	$28,5 \times 10^{-6}$	Этилен	$5,47 \times 10^{-6}$
Азот	$9,44 \times 10^{-6}$	Водород	$18,3 \times 10^{-6}$
Кислород	$9,95 \times 10^{-6}$	Ртуть	$6,10 \times 10^{-6}$

Зависимость длины свободного пути электрона от температуры газа была дана М. Ситниковым, исходящим из теории внутреннего трения; позднее те же формулы получил Гюнтершульце. Формула Ситникова имеет вид:

$$l = 760 \frac{L}{p} \frac{AT^{\frac{3}{2}}}{T+C} \sqrt{\frac{T}{273}}, \quad (43)$$

где T — абсолютная температура, L , A и C — характерные для газа постоянные, p — давление газа в миллиметрах ртутного столба.

В газовых выпрямителях рассматриваемого типа изменение длины свободного пути под действием тех или иных факторов имеет очевидно кардинальное значение, и, так как при работе с большими токами газ в выпрямителе нагре-

зается, существенно зная зависимость длины свободного пути λ от температуры. На рис. 50, заимствованном из книги Ситникова, приведены данные для $\frac{\lambda_e}{\lambda_{273}}$ при разных соотношениях между объемом горячей и холодной частей трубки. Приведенные кривые показывают, что можно сохранить постоянство λ даже и при больших изменениях температуры, если нерабочая часть трубки будет иметь очень малый объем и если температура ее будет достаточно высока.

Наиболее просто может быть рассчитан газовый выпрямитель данного рода для случая плоских электродов. Пусть a и b (рис. 51) два электрода такого

выпрямителя, E — разность потенциалов между ними, выраженная в вольтах (знак приложенного потенциала указан на чертеже). Магнитное поле (в гауссах) направлено

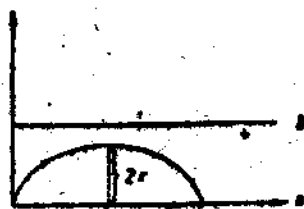


Рис. 51. Траектория электрона между плоскими электродами выпрямителя с магнитным контролем.

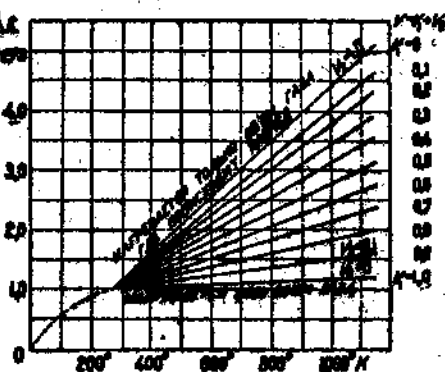


Рис. 50. Зависимость $\frac{\lambda_e}{\lambda_{273}} = \varphi [T(K)]$ при различных объемах нагреваемого газа.

перпендикулярно к плоскости электродов. Вылетевший из a электрон будет двигаться по циклоиде, радиус образующего круга которой будет:

$$r = \frac{Em}{H^2 e}.$$

При некотором значении H циклоида коснется верхнего электрода: это значение магнитного поля, согласно установившейся терминологии, мы будем называть критическим.

Из приведенного выше уравнения $H_{кр}$ легко определяется $r_{кр} = \frac{b}{2} = \frac{Em}{bH_{кр}^2 e}$ (здесь b расстояние между электродами):

$$H_{кр} = \sqrt{\frac{2m}{e}} \sqrt{\frac{E}{b^2}} = 3,35 \frac{\sqrt{E}}{b} \quad (44)$$

При больших, чем критическая, величинах поля электрон, вылетевший из a , вернется на этот же электрод, двигаясь вдоль полной циклоиды. Зная все элементы движения, нетрудно так задать магнитное поле, чтобы длина пути электрона в трубке была в некоторое k раз больше расстояния между электродами. На схематических рисунках 52-а и -б легко видеть, что в известных пределах

одна и та же длина пути может быть получена при двух значениях магнитного поля (одно из этих значений меньше, другое больше критического).

Подсчет показывает, что в первом случае (H — меньше критического) магнитное поле определяется уравнением: ¹

$$H = \sqrt{\frac{4(k-1)}{k^2}} 3,35 \frac{\sqrt{E}}{b} \text{ гаусс,} \quad (45)$$

где k — отношение пути электрона к расстоянию между электродами; для второго случая (H — больше критического) H задается равенством:

$$H = \sqrt{\frac{4}{k}} 3,35 \sqrt{\frac{E}{b}} \text{ гаусс.} \quad (46)$$

Рис. 53 представляет графически зависимость длины пути электрона от H при разных E ; первая группа кривых отвечает значению магнитного поля меньшему, вторая большему критического



Рис. 52. Траектории электронных путей равной длины при значениях магнитного поля выше и ниже критического.

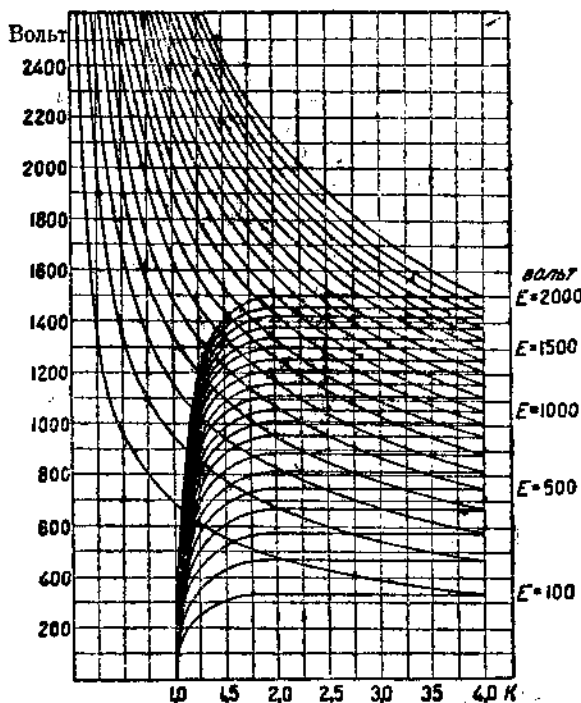


Рис. 53. Зависимость длины пути электрона от силы магнитного поля при разных значениях разности потенциалов между плоскими электродами выпрямителя с магнитным контролем.

Рис. 53 позволяет легко и быстро определить H по заданным E и k , отсюда же можно найти и величину критического магнитного поля.

Для получения выпрямления в приборе с плоскими электродами в пространстве между ними создают постоянное магнитное поле H_1 , на которое накладывается переменное H_2 от источника выпрямляемого тока. Давление газа в трубке и расстояние между электродами подбирается таким образом, чтобы при $H_1 + H_2$ длина пути электрона в трубке была больше длины свободного пути; в этом случае возможна ионизация газа и через трубку проходят большие токи. За следующий полу-

¹ Вывод формул (45) и (46) и диаграмма рис. 53 даны М. Ситниковым в его книге «Ионные процессы и некоторое их техническое использование», 1928 г.

риод, когда магнитное поле имеет значение $H_2 - H_1$, путь электрона должен быть короче длины свободного пути, ионизации в трубке нет, ток через нее не проходит. Необходимость пользоваться добавочным постоянным магнитным полем в трубках с плоскими электродами заставила отказаться от подобного рода конструкции и перейти к трубкам с цилиндрическими электродами. Величина критического магнитного поля в такой трубке зависит от направления электрического поля.

Буш и Смит (Busch и Smith), для случая катода на внутреннем электроде, для величины $H_{кр}$ вывели соотношение:

$$H_{кр} = \sqrt{\frac{2m}{e}} \sqrt{E} \frac{2R}{R^2 - r^2}; \quad (47)$$

для катода на наружном электроде $H_{кр}$ равно:

$$H_{кр} = \sqrt{\frac{2m}{e}} \sqrt{E} \frac{2r}{R^2 - r^2}; \quad (48)$$

в этих формулах E — разность потенциалов между электродами, R и r — соответственно радиусы наружного и внутреннего цилиндров.

Для определения $H_{кр}$ в случае цилиндрических электродов можно пользоваться кривыми рис. 53, если ввести „фиктивные расстояния“ b_R и b_r , соответственно равные:

$$b_R = \frac{R^2 - r^2}{2r}; \quad b_r = \frac{R^2 - r^2}{2R}.$$

Выражая $H_{кр}$ через „фиктивные расстояния“, легко получить следующие равенства:

Плоские электроды:

$$H = 3,35 \frac{\sqrt{E}}{b};$$

Цилиндрические электроды, внутренний электрод — анод:

$$H = 3,35 \frac{\sqrt{E}}{b_R}; \quad (49)$$

Цилиндрические электроды, внутренний электрод — катод:

$$H = 3,35 \frac{\sqrt{E}}{b_r}. \quad (50)$$

Из написанных выше уравнений следует, что отношение критических полей при цилиндрических электродах обратно пропорционально их радиусам; последнее обстоятельство позволяет очень удобно использовать такого рода трубки для конструкции выпрямителей. Нами был опущен вывод формул (47) и (48) и причина разных значений $H_{кр}$ на наружном и внутреннем электродах может остаться неясной; не лишним будет поэтому пояснить физическую сторону явления. В том случае, когда катод оказывается на внутреннем электроде, где градиент относительно высок, электроны уже на очень близких рас-

стояниях от электрода приобретают большую скорость и относительно мало отклоняются магнитным полем; в обратном случае, при катоде снаружи, даже на значительной части пути электрона, он проходит небольшие разности потенциалов, действие магнитных сил велико, $H_{кр}$ имеет малое значение.

Магнитное поле в цилиндрических трубках выбирается большим одного и меньшим другого критического значения. Трубка, помещенная в такое магнитное поле, будет проводить ток только в одном из направлений, когда катод оказывается на внешнем электроде. Давление газа должно быть при заданном H выбрано таким образом, чтобы длина свободного пути электрона заключалась в пределах

$$R - r < e < 2R.$$

При прохождении тока в трубке образуются объемные заряды, которые несколько искажают приведенные выше зависимости; здесь приходится считаться с затягиванием тока, некоторым изменением длины пути электрона в трубке и т. д.; все это, однако, лишь немного меняет характер явления.

Выпрямители с магнитным контролем строятся обычно на напряжения от 2000 до 6000 В при нормальных силах тока в 100—150 мА, причем допускаются кратковременные нагрузки до 400 мА. Приводим здесь данные для выпрямителя „14—28“, сконструированного М. М. Ситниковым.

Цилиндрические латунные электроды трубки имеют диаметры 14 и 28 мм, длина электродов 60 мм, расстояние между ними $14 - 7 = 7$ мм, давление воздуха в трубке от 0,8 до 0,2 мм ртутного столба, напряжение магнитного поля от 100 до 300 гауссов.

В выпрямителях с магнитным контролем *существенно*: 1) располагать в разрядном пространстве вполне определенными полями как электрическим, так и магнитным, 2) обеспечить расстояние между электродами везде меньшее длины свободного пути, 3) позаботиться о постоянстве последней величины. Эти требования вызывают ряд особенностей в конструкции выпрямителей.

Необходимость иметь определенное электрическое поле в пространстве между электродами заставляет металлически защищать это пространство от ползучих зарядов на стеклянных стенках трубки. Для достижения постоянства длины свободного пути необходимо при конструировании отводить под нерабочую часть трубки лишь очень небольшой объем; желательно также охлаждение рабочего объема трубки.

Газовые выпрямители описываемого рода начали разрабатываться сравнительно недавно, в практику еще не вошли, но есть основания ожидать их широкого технического применения в области радиотехники.

8. Выпрямители с объемным контролем.

Выпрямители, основанные на сравнимости расстояния между электродами и длиной пути электрона в трубке, кроме магнитного контроля допускают так называемый объемный контроль.

Впервые такого рода выпрямители были сконструированы Бушем и Смитом; выпрямление здесь вызывается объемным зарядом, возникающим в результате разных подвижностей положительных (ионов) и отрицательных носителей (электронов) электричества. На рис. 54 дана схема выпрямителя Буша и Смита. Один из электродов, A — пластинка, другой K , имеет в средней части отверстие в виде неглубокой трубочки. Расстояние b между плоскостями электродов A и K меньше длины свободного пути, расстояние c от A через трубку

■ до K больше этой величины. Во время работы выпрямителя из-за разных подвижностей ионов и электронов внутри трубочки B образуется положительный объемный заряд, в результате чего распределение потенциала для разных направлений поля оказывается асимметричным (оно схематически представлено на рис. 55).



Рис. 54. Схема устройства выпрямителя с объемным контролем системы Буш и Смит.

В том случае, когда на чащеобразном электроде K находится анод, путь электрона в области больших градиентов мал (b меньше длины свободного пути), ионизации газа в трубке почти нет. Во второй полупериод, когда катод оказывается на K , электроны проходят большой путь в поле с высоким градиентом (c —больше



Рис. 55. Распределение потенциала при разных направлениях поля в выпрямителях системы Буш и Смит.

длины свободного пути) и производят бурную ионизацию. Выпрямители с объемным контролем работают не ниже некоторой определенной частоты: предельная частота задается временем, в течение которого положительный объемный заряд исчезает под действием поля.

9. Выпрямитель с накаливаемым катодом фирмы Siemens.

Несколько отличается от аргоновых выпрямителей типа Тунгар (Tungar), имеющих в качестве катода вольфрамовые нити, выпрямитель фирмы Siemens (Сименс) (рис. 56). В этом выпрямителе устранены недостатки, связанные с вольфрамовым катодом и заключающиеся в быстром разрушении этого катода.



Рис. 56. Общий вид выпрямителя с накаливаемым катодом фирмы Сименс.

С другой стороны они отличаются от выпрямителя с торированным вольфрамовым катодом тем, что не теряют так быстро активности нити, как этот последний. В качестве катода здесь взяты нити из торированного молибдена, который не столь чувствителен к повышению температуры, как торированный вольфрам. Кроме того, торированный молибден лучше выдерживает бомбардировку положительными ионами, если только газ, которым наполнена колба выпрямителя, не реагирует химически с молибденом. Преимуществом является также и то, что торированный молибден не нуждается, как это имеет место у вольфрама, в активизации.

Колбы выпрямителя рассчитаны на выпрямление обоих полупериодов, почему и снабжены двумя анодами. Для наполнения колбы взят аргон. Падение в колбе колеблется между 8 и 10 вольтами. Давление аргона зависит от величины выпрямляемого напряжения и берется тем меньшим, чем выше это последнее.

Срок службы выпрямителя достигает нескольких тысяч часов. Столь высокий срок может быть объяснен медленным испарением катода и незначительной скоростью его перекристаллизации при тех низких температурах, которые здесь применены; величина этой температуры колеблется, в зависимости от нагрузки, в пределах от 1300° до 1700° . В качестве анодов в этих выпрямителях применены танталовые диски.

Таблица 24.

Главнейшие данные выпрямителя фирмы Siemens (Сименс)

Тип	Напряже- ние нити накала V	Ток накала A	Выпрямлен- ный ток, максимально A	Выпрямлен- ное напряжение V	Анодное на- пряжение, максимально V	Наиболь- шая высота коды с цоколем мм	Наиболь- ший диа- метр коды мм
Gl 1	1,75	4,5	1,0—1,5	—	2× 28	125	45
Gl 1,5 . . .	1,45—1,5	7	1,5	35—40	2× 55	125	50
Gl 3c	2,3—2,4	12	3,0	35—40	2× 55	190	80
Gl 3e	2,3—2,4	12	3,0	35—40	2× 55	215	80
Gl 6c	2,2	13	6,0	35—40	2× 55	225	100
Gl 6e	2,2	13	6,0	35—40	2× 55	250	100
Gl 10a . . .	2,2	17	10,0	35—40	2× 55	300	140
Gl 10c' . .	2,2	17	10,0	35—40	2× 55	335	130
Gl 10e' . .	2,2	17	10,0	35—40	2× 55	335	130
Gl 0,1b . .	1,75	4,5	0,1—0,15 или 1,0—1,5	100	2×125 или 2× 28	125	50
Gl 1,5b . .	1,75—1,8	9	1,5	—	2×125	215	80
Gl 3b	2,2—2,3	12	3,0	—	2×125	250	100
Gl 6b	2,45—2,5	17	6,0	—	2×125	335	130
Gl 10b' . .	2,8	22	10,0	—	2×125	400	150

10. Выпрямители типа АРА.

Германские аккумуляторные фабрики изготовляют выпрямители с накалившимся катодом, которые обнаруживают весьма большой срок службы последнего. Это достигается специальным расположением частей выпрямителя и материалом нити, несущей активный слой катода. Другим достоинством этой системы является устранение опасности обратного зажигания при больших силах тока. Последнее свойство достигается тем, что аноды a_1 и a_2 (рис. 57) помещены не непосредственно близ катода k , а защищены экранирующим устройством s_1 и s_2 , отделяющим аноды. Это устройство изменяет направление силовых линий, как показано на рис. 57; из рис. 57 видно, что аноды помещены в коробках s_1 и s_2 , открытые части которых покрыты сеткой g_1 и g_2 ; помощью такого расположения удастся при расстоянии между анодами всего в 3 см и при токе в 20 ампер работать при напряжении в 300 вольт.

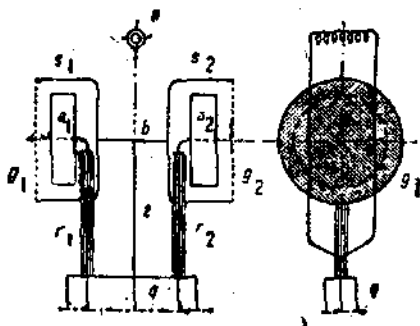


Рис. 57. Схема устройства выпрямителя с накалившимся катодом фирмы АРА.

11. Выпрямитель типа Philips.

Фирма Philips (Филиппс) строит выпрямители с катодом Венельта для зарядки от 1 до 6 аккумуляторов, при силе тока в 1,3 ампера; этот выпрямитель состоит из двух колб, из которых одна служит в качестве вентиля, а другая заключает в себе железное сопротивление, ограничивающее ток. На рис. 58 дана схема включения этого выпрямителя. Выпрямитель имеет два анода, почему работает с высокой отдачей.

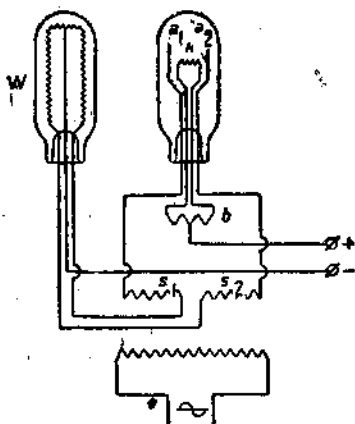


Рис. 58. Схема включения выпрямителя фирмы Филипс с катодом Венельта.

Железное сопротивление включено в каждую из анодных цепей, причем трансформатор включен по схеме дивизора; такое устройство имеет целью устранение прохождения токов между анодами, почему выпрямитель и не испытывает нарушений работы, вызываемых обратными зажиганиями. Благодаря этому обстоятельству, электроды могут быть расположены близко друг от друга, почему падение в выпрямителе составляет всего от 5 до 7 вольт. Давление аргона может быть поднято до 15 мм, что влияет благоприятно на распыление катода, обуславливая большой срок службы выпрямителя.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ.

1. Алюминиевый выпрямитель.

Из алюминиевых выпрямителей широко были распространены ранее выпрямители системы Гриссона, изготавливаемые фирмой Зейферт в Гамбурге. Конструкция этих выпрямителей состоит из алюминиевой пластинки как анода, железного катода и электролита из раствора соды. Выпрямители этого типа изготовлялись на мгновенные токи до 100 ампер, при 20 амперах продолжительной нагрузки и до 240 вольт выпрямленного напряжения. В таблице приведены основные данные выпрямителей Гриссона.

Таблица 25.

Нагрузка в амперах		Размеры в см		Примечание
максимальная	продолжительная	длина	ширина	
5	1	60	21	Однофазный ток; 110 вольт постоянного тока; число элементов 4
10	2	60	28	
25	5	110	30	
50	10	110	30	
100	20	110	60	

Выпрямители Ноден отличаются от гриссоновских тем, что анод имеет вид стержня из алюметированного цинка и электролит из фосфористого аммония. Поверхность анода регулируется передвижением изолирующей трубки, закрывающей часть стержня. Падение в вентиле составляет около 10 — 12%, всех потерь.

В выпрямителе Миткевича использована зависимость выпрямляющего действия от плотности тока алюминиевого анода, почему здесь анод состоит из алюминиевой проволоки, при свинцовом цилиндрическом катоде. Электролит здесь охлаждается амеевиком.

Из алюминиевых выпрямителей в настоящее время в Германии сравнительно распространены выпрямители „Phuwe“. Здесь железный цилиндр прибора служит и сосудом и индиферентным электродом; вторым электродом служит укрепленный в крышке сосуда алюминиевый стержень. В качестве электролита употребляется водный раствор углекислого аммония; он легко может быть сменен через кран внизу сосуда. Необходимым условием надежной работы выпрямителя является чистота употребляемых материалов, особенно алюминия. При вальцовке в алюминий внедряются мелкие частицы железа, что ведет к ухудшению выпрямления и к быстрому разъеданию электрода; перед употреблением необходимо протравить алюминий едким натром и тщательно вымыть дистиллированной водой. То же самое относится и к электролиту; последний должен быть приготовлен на дистиллированной воде, в препратах соли не должно быть хлоридов и нитратов (присутствие последних даже в небольших количествах заметно ухудшает выпрямление). Раствор в выпрямителе на два миллиметра покрывается маслом во избежание окисления алюминия на поверхности воздух-раствор, где оно обычно идет наиболее интенсивно.

Углекислый аммоний при 50° разлагается и выше этой температуры выпрямление становится уже неустойчивым. С другой стороны при очень низких температурах проводимость электролита относительно мала, что конечно ведет к значительным неудобствам. Оптимальной температурой вентилля нужно считать 40°, в связи с чем для указанных условий работы прибора подбираются его геометрические размеры. Алюминиевые выпрямители рассматриваемого типа не строят на большие напряжения. Уже для 100 вольт переменного тока нужно было бы требовать максимальное напряжение в 200 — 300 вольт и пришлось бы брать очень слабые растворы электролитов; сопротивление элемента стало бы большим, и потери в нем достигали бы больших значений. Указанные соображения заставляют конструировать отдельные элементы выпрямителя на напряжения не больше 30 вольт. Обычно вместе с выпрямителем монтируется ступенчатый трансформатор для регулировки напряжения.

В том случае, если после длительной работы выпрямление начинает падать, следует почистить алюминиевый электрод под током острым стальным или латунным резаком.

В самом простом виде, без дополнительных трансформаторов, на переменное напряжение в 30 вольт и на токи до одного ампера, эти выпрямители стоят в Германии всего 3 — 5 марок, они очень удобны в обращении и занимают мало места.

2. Танталовый выпрямитель.

Тантал дает выпрямление во всех электролитах и значительно более совершенное, чем алюминий. При конструкции подобных выпрямителей нужно только иметь в виду, что тантал очень хорошо поглощает водород, делается при этом хрупким и распадается сам собой. От этих неприятных явлений легко набавиться,

употребляя в качестве электролита смешанный раствор серной кислоты средней концентрации со слабым раствором FeSO_4 ; благодаря действию этой соли водород не выделяется непосредственно на поверхности металла, который таким образом предохраняется от разрушения. В технических выпрямителях этого рода в качестве электролита употребляется раствор $25\% \text{H}_2\text{SO}_4 + 0,8\% \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, в качестве индифферентного электрода — свинец.

Танталовые выпрямители строятся на силы тока от 0,4 до нескольких ампер, длительность их работы около тысячи часов.

3. Железный выпрямитель.

Гюнтершульце в 1912 г. нашел, что железный электрод в растворе крепкой серной кислоты дает хорошее выпрямление, если напряжение переменного тока не превосходит 60 вольт. Возможность пользоваться в качестве электролита серной кислотой представляется технически очень существенной, так как при этом значительно уменьшаются потери энергии в вентиле.

В Америке в настоящее время железные выпрямители получили широкое распространение. Употребление вместо железа стали позволяет еще лучше технически использовать выпрямитель, причем оказывается возможным применять 50%-ый раствор серной кислоты. Железные выпрямители для зарядки 6-вольтовых батарей строятся на силы тока до 2 ампер.

Стальной сосуд выпрямителя служит вентильным электродом; внутри сосуда помещается свинцовый, изолированный от него цилиндр, являющийся индифферентным электродом.

При малых нагрузках емкостные токи через слои изолятора на аноде целиком перекрывают здесь эффект выпрямления; при средних нагрузках соотношение сдвигается, но все же емкостной ток все еще значителен, и только при больших нагрузках он практически исчезает. Коэффициент полезного действия в железных выпрямителях не очень высок и достигает 25%. При длительных нагрузках температура прибора повышается от комнатной до $40 - 45^\circ$, на дне прибора откладывается слой мелкокристаллического сернистого свинца, выпрямление при этом не меняется, сопротивление же элемента несколько падает, и потери в нем уменьшаются.

4. Коллоидный выпрямитель.

В последнее время Андрэ нашел еще один тип жидких выпрямителей, получивших название „коллоидных“; первые его работы были произведены с серебряными электродами в растворах крепких кислот. Если два таких электрода погрузить в крепкий раствор H_2SO_4 или H_3PO_4 и включить этот элемент в цепь постоянного тока, то можно заметить, что в ванне идет сильный электролиз. С течением времени электролиз ослабевает, и вместе с этим кислота принимает желтоватую окраску, в ней образуются коллоидные частицы серебра размерами от 2 до 5×10^{-5} см. Вместе с этим можно заметить, что коллоидные частицы у катода начинают коагулировать, направляются отсюда к аноду, и проводимость ванны теряет электролитический характер. Если собрать элемент с теми же кислотами, одним серебряным электродом, другим электродом из любого металла, образующего прочную и нерастворяющуюся в указанных кислотах пленку окислов, то в системе наблюдается выпрямление, и в проводящем направлении (серебро $\rightarrow$ анод), внутреннее сопротивление элемента очень мало. Теория работы этого выпрямителя, развитая Андрэ, аналогична механизму Гюнтершульце для алюминиевых аэнтелей. При катоде на металле с окислами

электроны, вырванные из него, проходят через слой окислов, при обратном направлении тока — поле мало для вырывания электронов из ионов электролита. Разница в работе „коллоидного“ и „алюминиевого“ выпрямителей сводится к тому, что в первом из них, благодаря образованию нитей из коллоидных частиц серебра, проводимость элемента имеет металлический характер, и сопротивление его мало. Так же как и во вторых элементах характер и долговечность прибора Андре определяются прочностью слоя окислов. В связи с последним обстоятельством стоит то любопытное свойство этих выпрямителей, что они дольше живут при работе на цепь со встречной э. д. с.; в этих условиях период реоксидации слоя оказывается очевидно большим времени дезоксидации. Для каждого из катодных металлов существует предельное напряжение, выше которого элемент проводит ток в обоих направлениях. В таблице приведены предельные и оптимальные напряжения для ряда металлов. Данные относятся к переменному 50-перiodному току для раствора серной кислоты (65° Б) и температуры в 20°.

Таблица 26.

Материал	Предельное напряжение, в В	Оптимальное напряжение выпрямления, в В
Свинец	60	12
Никель	60	18
Мягкое железо	40	25 — 28
Алюминий	70	20
Кремний	100	50

Некоторые сплавы железа, особенно железа с никелем и железа с кремнием обладают лучшими свойствами, чем чистые металлы, перечисленные в таблице. Слой окислов образуется на них быстрее и оказывается более прочным. С увеличением температуры улучшаются и выпрямительные свойства системы, но до тех лишь пор, пока не начинается растворение кислотой слоя окислов. Предельной температурой нужно считать 80°; оптимум же действия лежит между 40 и 60°.

В технических выпрямителях средой служит не чистая кислота, а паста из порошка пемзы и фосфористой кислоты.

Длительность работы выпрямителя при работе на цепь со встречной э. д. с. около 1000 часов, при нагрузке же на активное сопротивление всего лишь 50 часов. При зарядке аккумуляторов можно получать в выпрямителе силы тока до 2—3 ампер. При параллельном включении выпрямителей необходимо последовательно с каждым из них включать сопротивление, при последовательном — каждый из элементов должен быть шунтирован.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

ДЕТЕКТОРЫ И ТВЕРДЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ.

1. Детекторы.

Детекторы, употребляемые в радиотехнике, представляют системы для выпрямления высокочастотных переменных токов, низкого напряжения и малой мощности. Материалом детектора служат различные минералы; электродами —

острие и пластина; материал пластины безразличен для работы этих выпрямителей, материал же острия играет иногда существенную роль. Приводим таблицу детекторов; для каждого из них указан наиболее употребительный контакт.¹

ТАБЛИЦА 27.
УНИПОЛЯРНЫЕ КОНТАКТЫ.

Разряд	Название	Химический состав	Соответствующий контакт
Природные сернистые соединения	Гален	PbS	Графит, сталь, теллур Медь, золото Алюминий, золото Серебро, медь
	Пирит	FeS ₂	
	Халкопирит	CuFeS ₂	
	Молибденит	MoS ₂	
	Сфалерит	ZnS	
	Смаьтин	CoAs ₂	
Природные окиси	Цинкит	ZnO	Халкопирит, сталь, уголь
	Куприт	Cu ₂ O	
	Церуссит	PbCO ₃	
	Псидомелан	MnO ₂	Серебро
	Брукит	TiO ₂	
	Изерни	FeTiO ₃ + FeO	
Искусственные соединения	Карборунд	SiC	Сталь, латунь, пирит
	Плумбит	Na ₂ PbO ₃	Сталь, золото, висмут
	Силикон	Si кристалл	

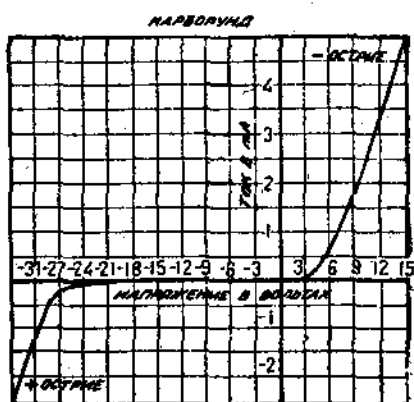


Рис. 59. Вольтамперная характеристика детектора из карборунда.

Работа любого из детекторов определяется рядом условий: 1) состоянием поверхности в месте контакта, 2) давлением, 3) частотой и 4) силой тока.

Мы не имеем здесь возможности детально разбирать влияние всех перечисленных факторов и только в немногих словах остановимся на каждом из них.

1. Различные точки кристалла дают различное выпрямительное действие; иногда от точки к точке меняется и направление выпрямления; эти явления связаны, видимо, с различным строением (как по составу, так и по толщине) тонкого изолирующего слоя на поверхности детектирующего материала. Работами последних лет показано, что можно облагородить детек-

¹ Эта таблица заимствована из книги проф. Флоренского „Диэлектрики и их техническое применение“.

торы, наводя искусственно на них слой непроводников. Помещая пирит (некоторые сорта этого материала не дают выпрямления) в пары серы, удается вызвать в нем отчетливое выпрямление, мало меняющееся при переходе от одной точки к другой.

2. Изменение давления острья на поверхность материала для некоторых из детекторов сильно сказывается на их выпрямляющем действии, для некоторых же, в пределах от 4 до 550 г, незаметно никаких изменений. В галеновых выпрямителях, наиболее часто применяющихся в радиотехнической практике, существует некоторый оптимум давления.

3 и 4. Частота обычно мало сказывается на выпрямлении; при увеличении напряжения (в некоторых пределах) растет и выпрямленный ток (приблизительно по квадратичному закону).

На рис. 59 приведена наиболее характерная вольтамперная зависимость детектора из карбунда.

2. Твердые выпрямители.

Уже давно делались попытки построить твердые выпрямители на большие, чем в детекторах, силы тока. Павловский в 1904 г. пытался собрать выпрямитель с алюминиевым электродом и затвердевшим расплавом Cu_2S . Он получил некоторое выпрямление, но слабое и недостаточно устойчивое. Общество Mallory & Co конструирует теперь такого типа выпрямитель из спрессованного Cu_2S с прижатыми к нему электродами. Выпрямитель „Сульфотрон“ строится из расположенных одна на другой пластин красной меди и алюминия, погруженных в раствор многосернистого аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_m$. Под действием последнего на поверхности алюминия образуется сульфид, который в результате гидролиза переходит в изолирующий слой окислов. В этой форме, повидимому, осуществляется наилучшее техническое выполнение выпрямительной системы алюминий — Cu_2S ; в пропускающем ток направлении допустимая плотность его достигает одного ампера. Выпрямитель Рубэна, сильно распространенный в Америке, аналогичен выпрямителю алюминий-сернистая медь. Твердой солью в нем служат металлические селениды и сульфиды. Пластины латуни с 85%-ным содержанием меди и 15%-ным цинка амальгамируют и затем подвергают действию смеси паров серы (1/5) и селена (4/5). Последний процесс ведут при температуре в 800° в отсутствии воздуха. На полученную поверхность накладывается кусок окисленного магния. Приборы Рубэна устойчивы, и, как указывает автор, даже после 6000 часов работы в них нельзя заметить никаких изменений.

Общество Mallory & Co запатентовало выпрямитель с окисью тантала и перекисью свинца, а Дюбар сконструировал из той же перекиси свинца другую систему, употребляя вместо окиси тантала окись цинка. Монтровка его выпрямителя аналогична описываемому дальше выпрямителю Грондала, наилучшей из известных пока систем.

В выпрямителях Дюбара порошок PbO_2 спрессовывается под давлением в $40 - 50 \text{ кг/см}^2$ и зажимается между свинцовым и цинковым электродами. Весь выпрямитель нуждается в предварительной формовке, заключающейся в последовательных переключениях тока. Как показали опыты самого же Дюбара, PbO_2 можно заменить MnO_2 . Характеристики всех перечисленных выше выпрямителей аналогичны характеристике Грондалевской системы и здесь не приводятся.

3. Выпрямитель Грондаля.

В 1927 г. Грондаль и Гейгер опубликовали в „J. A. I. E. E.“ результаты своих исследований с твердой системой из окислов меди. Их выпрямитель состоит (рис. 60) из диска красной меди Cu с нанесенным на него слоем закиси меди Cu_2O . Другим электродом служит диск Pb , сделанный из какого-либо мягкого металла (свинцовая или золотая фольга), который плотно прижимается при помощи другого медного диска и винта с гайкой. Процесс выпрямления происходит в тонком (порядка 0,1 — 0,5 мм) слое закиси меди, причем ток, проходящий в направлении от слоя закиси Cu_2O в медный диск Cu , больше тока, текущего в обратном направлении. Каждый такой элемент годен для выпрямления тока напряжения 2—6 вольт; плотность тока не должна превышать 0,3 ампера на 1 см^2 . При больших плотностях тока необходимо применять какое-либо искусственное охлаждение: продувание сильной струи воздуха или погружение в масляную ванну; в таких случаях удается повысить плотность тока до 0,5 — 0,6 ампера на кв. см.

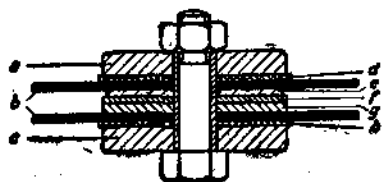


Рис. 60. Выпрямитель Грондаля.

Исследования Грондаля и Гейгера показали, что процесс выпрямления протекает при полном отсутствии электрических или каких-либо других физико-химических изменений. На рис. 61 представлена характеристика подобного выпрямителя, причем масштаб сил токов при отрицательных напряжениях увеличен для ясности в 2×10^3 раз.

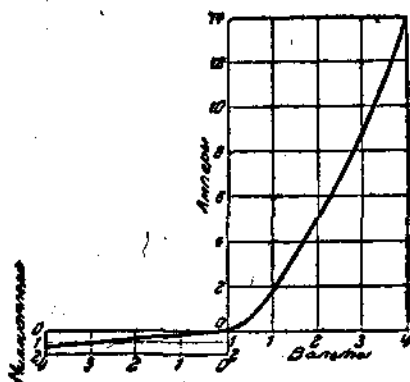


Рис. 61. Вольтамперная характеристика выпрямителя Грондаля.

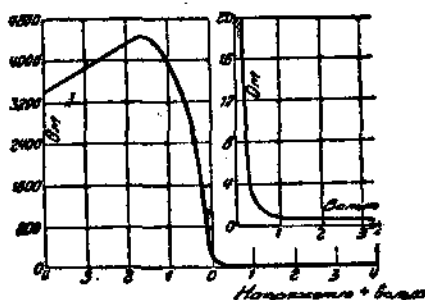


Рис. 62. Зависимость сопротивления выпрямителя Грондаля от приложенной разности потенциалов.

На рис. 62 показана зависимость сопротивления выпрямителя от приложенной разности потенциалов.

Для получения слоя Cu_2O на меди, отрезки красной меди помещают в электрическую печь, нагретую до 1100° ; время выдержки в печи определяется экспериментально, так как оно зависит от толщины взятых медных дисков; обычно оно измеряется несколькими минутами. После выдерживания определенного промежутка времени при температуре 1100° пластину перемещают в другую печь, где температура должна быть не выше $200—300^\circ$ и выдерживают ее здесь около 10 — 15 минут. После такой обработки поверхность пластины приобретает черный (или темнокрасный) цвет, обязанный тонкому

слою окиси меди CuO . Этот слой окиси вреден, так как, обладая значительным сопротивлением, сильно увеличивает внутреннее сопротивление выпрямителя; слой окиси следует удалить или при помощи тонкой наждачной бумаги, или же обрабатывая поверхность пластины при помощи крепкой азотной кислоты.

Для выпрямления напряжений больших, чем 4—6 вольт, такого рода выпрямители соединяются последовательно в виде „вольтовых столбов“. Грондаль указывает, что ему удалось построить последовательным соединением достаточного количества выпрямительных элементов выпрямитель на 1000 вольт при 2—3 амперах.

Было создано много теорий механизма выпрямителя в твердых полупроводниках. Насколько позволяет судить экспериментальный материал последних лет, наиболее отвечающими реальному положению вещей следует признать теорию Шоттки для электронно-проводящих и дендритную теорию для ионно-проводящих тел. Не претендуя на полноту изложения состояния этого вопроса, мы и остановимся только на этих двух построениях.

Согласно теории Шоттки действие детекторов следует представлять себе следующим образом. При наложении металла-острия на детектирующий кристалл контакт между ними нельзя считать совершенным. Между острием и поверхностью кристалла остается очень тонкий слой (порядка 10^{-6} , 10^{-7} см) газа или другого непроводника (слой окисла и т. д.). При включении напряжения фактически весь приложенный потенциал падает на этот тонкий слой, в котором таким образом господствуют очень большие градиенты и становится возможным „холодное вырывание“ электронов из металла-острия, если оно оканчивается катодом; в виду того, что электроны в детектирующем кристалле связаны сильнее, чем в металле, при перемене знака напряжения электронный ток прекращается.

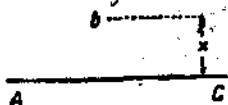


Рис. 63.

Теория Шоттки базируется на предположении, что в полях с градиентом потенциала в 10^6 , 10^7 вольт/см возможно вырывание электронов из металла. Теоретическая возможность этого процесса была показана Шоттки из найденных на опыте значений разности потенциалов между металлом и вакуумом. Пусть AC (рис. 63) — поверхность металла, b — электрон на расстоянии x от этой поверхности. Пользуясь методом зеркальных отображений, можно утверждать, что до значения $x = x_0$, близкого к размерам атомов и к расстояниям между ними, силы притяжения между электроном и металлом представляются соотношением: $F = -\frac{e^2}{4x^2}$ и работа, которую нужно затратить для переноса электрона из бесконечности до расстояния x_0 от поверхности металла, будет:

$$+ \int_{\infty}^{x_0} -\frac{e^2 dx}{4x^2} = \frac{e^2}{4x_0}, \quad (51)$$

а потенциал E_1 будет:

$$E_1 = \frac{e}{4x_0}.$$

Для участка x -ов от поверхности металла до значения x_0 закон изменения потенциала, так же как и расстояние x_0 , неизвестны; Шоттки предлагает принять за x_0 ту абсциссу, при которой касательная к кривой зависимости потенциала от расстояния пересекает ось ординат при таком значении потенциала,

которое определено было из эксперимента (рис. 64). Это предположение задает таким образом линейное падение потенциала от поверхности до точки с абсолютной x_0 .

Общий скачок потенциала складывается из значений E_1 и E_2 скачков потенциала от бесконечности до x_0 и от x_0 до поверхности металла. Величина E_1 известна нам и равна:

$$E_1 = \frac{e}{4x_0}.$$

Для определения же E_2 достаточно взять напряжение поля в точке x_0 и умножить его на x_0 , так как поле равномерно в этом слое; таким образом получаем:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{e}{4x_0} + \frac{ex_0}{4x_0^2} = \frac{e}{2x_0}.$$

Переходя от абсолютных единиц к вольтам, получаем:

$$E = \frac{300e}{2x_0},$$

$$x_0 = \frac{300e}{2E}.$$

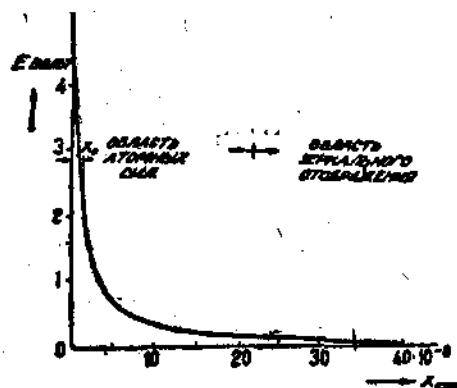


Рис. 64. График Шоттки для определения линейного падения потенциала от поверхности металла до точки, находящейся от поверхности на расстоянии x .

Максимальное поле, необходимое для вырывания электронов, окажется равным:

$$X_m = \frac{300e}{4x_0^2} = \frac{E^2}{300e} = 6,97 \times 10^6 \frac{\text{вольт}}{\text{см}}. \quad (52)$$

Результаты вычислений по этим формулам приведены в таблице 28 и дают значения x_0 и X_m для вольфрама и натрия.

Таблица 28.

Металлы	E_1 найденное из опыта	x_0	X_m вольт см	d —расстояние между атомами металлов
Na.....	1,5	$4,8 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^7$	$3,73 \times 10^{-8}$
W.....	4,5	$1,6 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^8$	$2,66 \times 10^{-8}$

Результаты подсчета показывают, что в полях с градиентом в 10^7 вольт/см возможно вырывание электронов. Существенно отметить, что критическое расстояние x_0 имеет тот же порядок величины и тот же ход, как и атомные расстояния соответствующих металлов.

Можно сказать, что веское экспериментальное подтверждение теории Шоттки получила только в последнее время, благодаря чрезвычайно интересным исследованиям Лосева. При изучении детекторного контакта „карборунд (SiC) — металлическая проволока“ последний доказал наличие электронного потока между металлом острия и поверхностью кристалла, наблюдая свечение на кристалле.

Исходя из квантовых представлений, можно было думать, что электроны, двигаясь в изолирующем слое между металлом и кристаллом и накапливая энергию, равную eV (V — пройденная разность потенциалов), способны при ударе вызвать свечение со сплошным спектром, максимальная частота которого ν будет:

$$\nu = \frac{eV}{h},$$

в этом уравнении h постоянная Планка, равная $6,54 \times 10^{-27}$.

Лосев определил из спектрограмм предельную максимальную частоту свечения в зависимости от разных условий опыта. В таблице 29 приведены значения предельной длины волны, соответствующие ей V , вычисленные по формуле и $V_{\text{экспер.}}$, найденные на опыте.

Таблица 29.

$\lambda_{\min}$ Å	V теор., V	V экспер., V	$\lambda_{\min}$ Å	V теор., V	V экспер., V
3200	4,7	3,58	3900	3,5	3,16
3400	3,8	3,63	3900	3,2	3,16
3900	3,5	3,16	3900	3,2	3,16

Получающееся совпадение настолько поразительно, что едва ли можно сомневаться в реальности электронного пучка между острием и кристаллом.

Работы Лосева, определившего ряд характеристик электронно-проводящих детекторов, дают еще ряд подтверждений взгляду Шоттки. Характеристики детекторов, в которых наблюдается свечение (цинкит-карборунд), представлены на рис. 65.

По Лосеву основная формула, определяющая действие контакта, выводится из формулы сопротивления вольтовой дуги и представляется соотношением:

$$V = \frac{1}{2} (IR + a \pm \sqrt{(a - IR)^2 - 4Rb}) + Ir, \quad (53)$$

где V есть разность потенциалов на зажимах детектора, r — сопротивление толщи кристалла, R — сопротивление точки контакта, т. е. тех областей, где идет электронный разряд, I — сила тока в цепи, a и b — постоянные. Из формул видно, что при данном значении V для I получаются два разных значения, как показывает и кривая рис. 65. В области спуска характеристики контакт отдает, а не затрачивает энергию; последнее обстоятельство позволило Лосеву применить детектор, как генератор электрических колебаний.

Теория Шоттки в настоящее время прочно обосновалась в учении о детекторах, и делались даже попытки распространить ее на электролитически

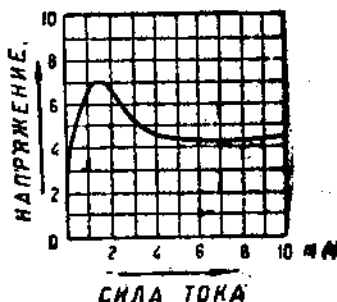


Рис. 65. Характеристика детектора карборунд-цинкит.

проводящие полупроводники. В 1928 г. Кобеко, Курчатов и Синельников показали однако непригодность этой теории для электролитических полупроводников и описали процессы в них, базируясь на явлениях формовки и роста дендритов.

Детальное обоснование новой теории было проведено с Cu_2S и CuS ; она была распространена и на выпрямитель Грондаля. Опыты показали, что во всех упомянутых соединениях выпрямление имеет место не только в том случае, когда электродами служат различные металлы, но и в тех случаях, когда одинаковые по материалу электроды имеют разные площади. Последнее обстоятельство позволило предположить, что существенным моментом выпрямления нужно считать разность в площадях электродов. Было установлено, что в тех случаях, когда выпрямление получается с одинаковыми по площади электродами, „эффективная“ поверхность у них (алюминий, магний и т. д.) меньше геометрической, благодаря наличию на поверхности металла непроводящего слоя окислов. Рядом опытов было показано, что во всех указанных солях под действием тока образуются непроводящие слои у анода (процесс формовки) и кроме того со стороны катода, вскоре по включении напряжения, легко прорастают тонкие нити, дендриты, замыкающие обкладки соли накоротко.

Работами Кобеко и Курчатова было показано, что в случае электродов разной площади, образец, в котором происходит формовка, обладает униполярной проводимостью. Униполярность возникает в результате различной скорости спадания тока со временем в разных направлениях. Количество электричества, которое должно быть затрачено в каждом из направлений поля в образце для образования определенной толщины слоя, и, стало быть, для определенного уменьшения силы тока по отношению к первоначальному, будет разным для каждого из направлений поля. Отношение этих количеств электричества равно отношению площадей электродов. Подобного рода униполярная проводимость была найдена в стекле при высоких температурах, слюде, AgI и ряде других веществ. Выпрямление в Cu_2S , CuS и Cu_2O кроме формовки обуславливается еще и ростом дендритов в соли; наложение этих двух факторов позволяет легко объяснить наблюдаемые здесь закономерности. Если анодом в цепи служит алюминий или магний, мосты, образующиеся в соли, не могут замкнуть накоротко электродов из-за быстрого (в виду небольшой площади алюминиевого анода) образования у него непроводящего слоя. При перемене знака напряжения такое замыкание становится возможным, и сопротивление образца падает.

Следует думать, что таков же механизм выпрямления и в Грондалевской системе. У поверхности меди промежуточные окислы, имеющие большое сопротивление, дают возможность проходить току лишь в ряде точек; эффективная поверхность внутреннего электрода значительно меньше геометрических размеров пластины. Специальными опытами было показано, что проводимость Cu_2O , по крайней мере в значительной ее части имеет электролитический характер, что в ней хорошо растут дендриты при напряжениях в 0,5—1 вольт; явление формовки также наблюдается в этом веществе. Пластина Cu_2O , помещенная между алюминиевым и медным электродами, дает очень хорошее выпрямление; такое же выпрямление получается и в случае электродов из одного материала, но различной площади; все зависимости, найденные для Cu_2S и CuS , повторяются и на пластинах Cu_2O . Данные Грондаля для зависимости $I=f(t)$ и осциллограммы при переменном токе также подтверждают рассматриваемую точку зрения.

СТЕКЛЯННЫЕ РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

ОБЩИЕ ДАННЫЕ.

1. Преимущества ртутных вентиляей.

Среди газовых выпрямителей пониженного давления совершенно особенное место занимают ртутные выпрямители благодаря целому ряду особенностей как ртутных паров, так и самого металла. Уже из таблицы 7 было видно, что пары ртути выделяются среди других газов весьма большим нормальным катодным падением, позволяющим строить вентиль на значительные напряжения. Но особенно благоприятным является то обстоятельство, что ртуть при тех температурах, которые имеют место в выпрямителе, может в разных его частях находиться как в жидкой, так и в газообразной фазе. Это дает возможность построения выпрямителя на очень высокие напряжения и вообще сообщает весьма большую гибкость этому прибору.

2. Стеклянные и металлические выпрямители. Амперная нагрузка.

По своей внешней конструкции ртутные выпрямители разделяются обычно на стеклянные и на металлические. Область применения первых ограничивается в настоящее время единицами, рассчитанными на токи до 250 ампер, хотя были попытки изготовления выпрямительных стеклянных колб, работающих при нагрузке в 500 ампер. Металлические ртутные выпрямители строятся на токи от нескольких сот до десяти тысяч ампер. Во многих случаях можно считать выгодной замену одного металлического выпрямителя рядом более мелких стеклянных выпрямителей. Вообще в настоящее время границей, разделяющей область применения стеклянных выпрямителей от металлических, надо считать 1000 ампер. Однако с каждым годом эта граница отодвигается в сторону увеличения мощности стеклянных ртутных выпрямителей.

Причиной, по которой отдается предпочтение стеклянным выпрямителям, является значительно большая простота установки и отсутствие необходимости надзора за устройством, что особенно важно при управлении таковым на расстоянии. Этого рода установки получают все большее и большее распространение.

Металлические ртутные выпрямители в настоящее время нуждаются в устройствах для поддержания вакуума, что усложняет установку. Однако, помимо разделения ртутных выпрямителей на стеклянные и металлические, первые из них могут быть по своей внутренней конструкции подразделены на целый ряд систем. Это подразделение необходимо сделать, так как конструкция внутренних органов оказывает очень большое влияние на работу выпрямителя, размеры его и, что особенно важно, на самую физику явлений, происходящих в выпрямителе.

3. Системы стеклянных выпрямителей.

Главнейшими конструктивными особенностями стеклянных выпрямителей должны быть признаны следующие: а) устройство катода и б) атмосфера, в которой работает катод и аноды. Другие детали не имеют столь большого значения, почему и будут описаны в других отделах.

По устройству катода стеклянные выпрямители могут быть подразделены на имеющие оксидный и на имеющие ртутный катод, на котором и образуется при работе светлое катодное пятно, источник электронов. В этом последнем случае выпрямитель не имеет тока насыщения, так как размеры пятна увеличиваются с увеличением силы тока. Катод в этом случае работает в атмосфере ртутных паров, насыщающих пространство.

Однако в последнее время начали получать распространение выпрямители с оксидным катодом, в котором источником электронов служит металлическая проволока или полоса, часто свитая в спираль, покрытая окислами тугоплавких металлов. В этом случае выпрямитель имеет ток насыщения, катод же работает обычно в парах ртути, лишь для низких напряжений насыщающих пространство; для высоких же напряжений пары не должны, как увидим ниже при описании этого рода выпрямителей, насыщать пространство.

Что касается атмосферы внутри стеклянной колбы, то ртутные выпрямители могут иметь чистые пары ртути, или колба может быть наполнена каким-либо благородным газом, что однако пригодно лишь для выпрямителей на низкие напряжения и сравнительно редко применяется.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

СТЕКЛЯННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ С ЖИДКИМ РТУТНЫМ КАТОДОМ.

1. История.

Этого рода выпрямители были разработаны для практического применения Купер Юиттом (Cooper Hewitt) в начале 900-ых годов, когда и был взят первый патент.

В основу выпрямителя легли работы с ртутной дугой, показавшие вентильное действие дуги в случае образования ее между ртутью и углем.

Первая работа была опубликована Жеменом и Менёвриэ (Jemin и G. Menévrié) в 1882 г. (Comptes rendus, 1882, 94). Однако наибольшее влияние на развитие выпрямителя оказала работа Арона (Aron) в 1890 г. с ртутной лампой, так как она показала, что высокую отдачу выпрямителя возможно получить в том случае, если дуга образована в разреженном пространстве.

Быстрое развитие стеклянные выпрямители с ртутным катодом получили в послевоенное время, когда они в большом числе начали изготавливаться американскими фирмами: G. E. C. и Westinghouse; германскими: Gleichrichter Ges., Allgem. El. Gesellschaft, Siemens, Brown-Boveri и у нас, в СССР, на заводах б. треста „Электросвязь“ и в Нижегородской радио-лаборатории Н. К. П. и Т., где типы этого рода выпрямителей были разработаны автором.

2. Устройство колбы.

Общее устройство современной ртутной колбы показано на рис. 66, представляющем колбу типа ЗВН завода „Светлана“ ВЭО.

Колба состоит из ртутного катода (8), анодов (4) из графита, угля или железа. Электроды находятся в трубках, припаянных к стеклянному резервуару, служащему в качестве регулятора давления ртутных паров. Помимо анодов (4), колбы, предназначенные для выпрямления тока свыше 3 ампер, имеют обычно вспомогательные электроды (5) в числе двух, реже трех, и весьма часто пусковой ртутный металлический или графитовый электрод (2).

В качестве материала для колб применяется химическое стекло, чаще мягкое свинцовое стекло, и наконец в последнее время большинство заводов как зарубежных, так и завод „Светлана“ в СССР перешли на так называемое молибденовое стекло. Применение того или другого стекла обуславливает в зна-



Рис. 66. Стеклянная колба выпрямителя с жидким ртутным катодом.

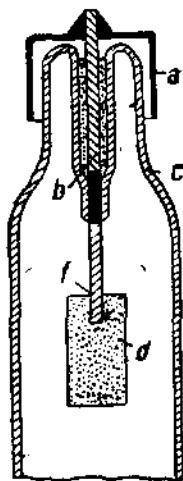


Рис. 67. Конструкция ввода из платины.

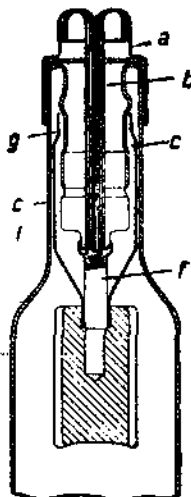


Рис. 68. Конструкция ввода с медным колпачком фирмы Gleichrichter-Gesellschaft.

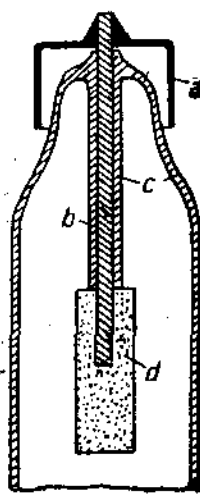


Рис. 69. Конструкция ввода из молибдена.

чительной степени материал и конструкцию вводов. В случае колб из химического стекла, имеющего коэффициент расширения около 0,08, вводы могут изготавливаться из платины или ее суррогатов. На рис. 67 показана конструкция ввода для этого случая.

При больших силах тока целесообразно делать ввод не в виде проволоки, или нескольких проволок, а в виде тонкого колпачка. Этот колпачок может быть также изготовлен из платины, но гораздо дешевле его изготовлять из меди. В этом случае медный штампованный колпачок, толщиной около 0,01 мм, соединяется с нагретой до размягчения стеклянной трубкой, к которой он и припаяется достаточно плотно, так как закись меди при нагревании колпачка растворяется в нагретом стекле, образуя промежуточный слой между медью и стеклом. Для защиты меди от амальгамирования она покрывается электролитически железом.

На рис. 68 показана такая конструкция, применяемая фирмой Gleichrichter-Gesellschaft. Вместо медного колпачка возможно применение колпачка из сплава железа с хромом, также хорошо сплавящегося со стеклом и имеющего

достаточно малый коэффициент расширения. Преимущество этого последнего ввода заключается в его значительной прочности.

Наибольшее распространение в настоящее время имеет ввод, показанный на рис. 69. Этот ввод состоит из молибденового стержня, впаянного в стекло. Эта система отличается значительной простотой и прочностью. Стекло здесь должно быть, как упомянуто выше, „молибденовое“. Благодаря его малому коэффициенту расширения, колбы, изготовленные из этого стекла, значительно более устойчивы при нагревании частей как при обработке, так и во время эксплуатации. Как видно из рисунка, стекло впаян держит здесь и самый электрод.

Ввод катода имеет обычно ту же конструкцию.

3. Действие стеклянной ртутной колбы.

Действие стеклянной ртутной колбы как выпрямителя заключается в следующем: колба, показанная на рис. 66, включается согласно схеме, приведенной на рис. 70, где 1 — трансформатор, ток которого выпрямляется, и 2 — вспомогательный трансформатор со средней точкой и напряжением вторичной обмотки порядка 55×2 V, при мощности около 0,15 kW.

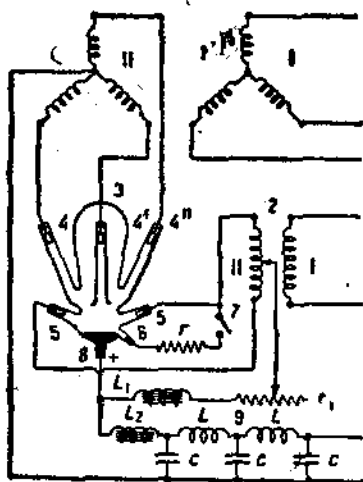


Рис. 70. Схема включения стеклянного ртутного выпрямителя.

Для приведения в действие колба наклоняется, и ртуть катода 8 приходит в соприкосновение с ртутью вспомогательного электрода 6; при обратном движении контакт между электродами 8 и 6 разрывается, и на катоде образуется светлое пятно (источник электронов) вследствие наличия в момент разрыва вспомогательной дуги.

Светлое пятно на катоде 8 является источником электронов, которые будут двигаться от катода 8 к анодам 5, если только между электродами будет иметься достаточно сильное электрическое поле. Это поле создается трансформатором 2.

Электроны, двигаясь от катода 8, будут встречать на своем пути атомы ртути, которые и будут ионизироваться, если вольтовая скорость электронов будет достаточно велика. При наступлении ионизации атом ртути будет распадаться на положительный ион и электрон, как это указано в гл. II, 7, ч. I. Положительный ион направляется к катоду и, ударяясь в него, теряет свою живую силу, за счет чего и поддерживается высокая температура светлого пятна. Опыт показывает, что устойчивое равновесие, иначе говоря, выделение тепла вследствие ударов положительных ионов, превосходит потери тепла, возникающие от: 1) лучеиспускания, 2) непосредственной передачи его ртути и наконец, 3) связанные с испарением ртути в том случае, когда сила тока вспомогательной дуги, или так называемой дуги возбуждения, идущей между электродами 8 и 5, превосходит приблизительно 3 ампера.

В виду этого, вспомогательные электроды 5 и необходимы во всех тех случаях, когда ток, даваемый главными рабочими электродами, падает ниже 3 ампер.

Если на катоде имеется светлое пятно, то при включенном трансформаторе *I* колба может работать, давая ток любой силы без всякого насыщения. В этом случае сила тока, которая может быть взята от выпрямителя, ограничивается лишь нагревом анодов 5, вводами их, а также давлением паров ртути внутри колбы. Отсюда видно, что колба может допускать значительную мгновенную перегрузку.

4. Катод ртутной колбы.

Возможность получения весьма больших сил тока, от ртутного катода объясняется тем, что с увеличением силы тока, проходящего через колбу, увеличивается размер светлого катодного пятна, т. е. увеличивается количество электронов, могущих быть использованными для образования переноса тока через пространство между электродами 8, 5 и 4.

Поверхность светлого пятна равна $2,53 \times 10^{-4}$ см² на 1 ампер силы тока, проходящего через катод, откуда видно, что плотность тока здесь достигает величины около 4000 А/см². Столь большая плотность тока обуславливает малые размеры светлого пятна и, значит, дает малые величины для отдачи тепла светлым пятном путем излучения. Так, при температуре светлого пятна в 5000° излучение составляет всего лишь 0,0366 ватт на ампер.

Общее количество энергии, развиваемой на катоде, складывается из энергии, полученной положительными ионами при их прохождении катодного падения и из энергии, полученной от нейтрализации положительных ионов. На первую часть приходится около 3,86 ватт/амп. и на вторую около 3,2 ватт/амп. Общее количество составляет таким образом ок. 7,07 ватт/амп. Эта энергия удаляется от катода следующим образом:

Передачей в ртуть катода	2,68 ватт
Излучением, если принять за температуру светлого пятна 2000°	0,04 .
На испарение ртути	2,20 .
Уносится электронами	2,15 .
Всего	7,07 ватт

Эти цифры являются приблизительными в виду трудностей определения катодного падения.

Из приведенных цифр и ряда простых соображений, можно заключить, что приблизительно половина тока колбы переносится путем перемещения электронов с катода на аноды и половина путем переноса положительными ионами при их продвижении к катоду.

Так как значительная часть энергии расходуется на испарение ртути, то давление паров ртути у светлого пятна достигает весьма высокой величины. Этим обусловлено весьма быстрое передвижение светлого пятна по поверхности ртути. Скорость достигает здесь 10 метров в секунду. При значительной скорости светлого пятна и малой его величине весьма затрудняется попадание положительных ионов на это пятно. При малых токах и быстром движении пятна может наступить упомянутое выше неустойчивое равновесие, при наступлении которого светлое пятно исчезает, и прохождение тока прекращается.

5. Положительный столб.

Электроны, как полученные за счет светлого катодного пятна, так и отщепленные от нейтральных атомов ртути ударами электронов, направляются к анодам, причем в данный момент к тем, которые создают соответствующее

ускоряющее поле вблизи катода. На пути электронов к анодам происходит частичная молизация, т. е. образование из положительных ионов и электронов нейтральных атомов. Эта молизация происходит на пути между анодом и катодом, где число положительных ионов и электронов в единице объема приблизительно равно. Это пространство называется, как было сказано выше, „положительным столбом“.

В виду малого количества ионов в положительном столбе и большой скорости электронов лишь немногие электроны молизуются. Остальные же, двигаясь по силовым линиям, доходят до анода. Однако движение электронов по силовым линиям совершается со значительными отклонениями и от этого пути, происходящими вследствие упругих столкновений с анодами, как это указано в гл. II, 18, ч. I.

В дальнейшем мы еще возвратимся к этому вопросу, как играющему большую роль у выпрямителей на высокие напряжения.

6. Анодное падение.

Электроны при своем приближении к аноду образуют анодное падение, описанное в гл. IV, 6, ч. I.

Это падение хотя и колеблется в некоторых пределах, в зависимости от давления паров ртути, но эти колебания не столь значительны, как на катоде, почему выпрямляющее действие ртутных выпрямителей и основывается на катодном, а не на анодном падении. В таблице 30, заимствованной у Гюнтершульце (Güntherschulze), приведены данные для анодного падения при различных давлениях.

ТАБЛИЦА 30.

Давление паров Hg p мм	Анодное па- дение V	Давление паров Hg p мм	Анодное па- дение V
0,004	13,0	1,07	5,5
0,028	11,6	1,82	6
0,36	5,8	2,73	6,8
0,68	5,6	4,08	6,8

Нагревание анодов, вызываемое ударами электронов, сравнительно не велико, в виду малой массы электрона.

Остановливаясь более подробно на анодном падении, приведем основные зависимости этого падения от давления, формы анода и т. д.

Зависимость от давления была уже дана в таблице 30.

Форма электрода влияет в том смысле, что вогнутые аноды, или вообще снабженные углублениями, дают меньшее падение. Это объясняется тем, что углубления предохраняют своими стенками от рассеивания энергию возбуждения и препятствуют удалению возбужденных молекул ртути, которое может иметь место вследствие диффузии.

7. Материал и форма анодов.

Материал анодов может влиять на анодное падение постольку, поскольку тот или другой материал имеет разное поглощение излучения возбуждения,

являющегося результатом ударов электронов о молекулы. Температура анода не влияет на анодное падение, так же точно, как не влияет и сила тока, проходящего через анод.

По смыслу выше приведенных для анодного падения данных конструктивно аноды выполняются обычно из графита, угля или железа. При этом последний, материал, при всех своих достоинствах, обладает рядом недостатков, из которых главные: большой вес анодов и малая способность отдавать тепло излучением. Значительный вес неудобен главным образом для стеклянных выпрямителей, как затрудняющий транспорт колб, тогда, как это обстоятельство не играет роли в металлических выпрямителях. Второе обстоятельство заставляет делать аноды весьма большой величины, в том случае, если нагрузка на аноды сравнительно велика. Положительным качеством надо считать сравнительно высокую теплопроводность железа, чем обуславливается более равномерная температура анодов, а значит повышается общая отдача лучеспусканием, при той же предельной температуре в начале анода.

Железные аноды применяются лишь в высоковольтных выпрямителях завода „Светлана“.

Что касается формы, то для малых анодов применяется цилиндрическая форма с углублением, обращенным к катоду, при больших же анодах часто применяется цилиндр с продольными канавками или даже анод звездообразного сечения, как это показано на рис. 71.

Наличие посторонних газов увеличивает анодное падение. Помимо того или другого анодного падения здесь для стеклянных выпрямителей весьма важен еще один вопрос. Если анодное падение играет роль в смысле размеров анода, необходимых для удаления выделившегося тепла, и с точки зрения коэффициента полезного действия устройства, связанного с потерями на аноде, то материал, форма и давление интересны еще и потому, что от них зависит распыление анода. Однако это явление происходит не в период прохождения тока через данный анод, а в тот период, когда анод меняет знак, становясь катодом, и выдерживает полное выпрямленное напряжение, а чаще и значительно большее, иначе говоря в период запирающего тока. Этот период будет описан ниже, почему мы там и коснемся тех требований к конструкции и материалу, которые предъявляет распыление.

При прохождении тока через колбу, помимо явлений на катоде и на аноде, необходимо рассмотреть путь электрона, лежащий между этими двумя точками. Здесь при хорошо откаченных колбах мы можем видеть, что пространство,

Рис. 72. Внешний вид колбы ртутного выпрямителя во время работы (свечение анодных рукавов).

лежащее выше катода, не имеет свечения, следовательно здесь мы не имеем, согласно главе II, ч. I, таких скоростей электрона, которые превосходят потенциал возбуждения, т. е. 4,68 вольт. Падение на всем этом пространстве не



Рис. 71. Анод звездообразного сечения.



превосходит 3—4 вольт. При аноде, лежащем весьма близко к поверхности катода, эта величина падает даже ниже двух вольт. Дальнейшее пространство, по которому проходит электрон на пути к аноду, окружено стеклянными трубками, в которых расположены аноды. Это пространство, как видно из рис. 72 (левая часть), дает интенсивное свечение тем большее, чем больший ток проходит к аноду. Объяснение этого свечения лежит во влиянии стенок на поток электронов.

8. Влияние стенок анодных трубок.

Электроны на своем пути по силовым линиям встречают атомы ртути, ударяясь о которые при скоростях меньших потенциала возбуждения (равного 4,68 В), теряют лишь ничтожную часть энергии, порядка 0,005% от всей энергии, причем, вследствие такого рода упругого удара, электрон меняет свой путь, отклоняясь от пути по силовым линиям.

Отклонения от пути ведут к тому, что электроны приближаются к стеклянным стенкам трубок, ударяют в них и прилипают к стеклу, сообщая ему отрицательный заряд. При наличии в трубках положительных ионов, эти последние притягиваются к отрицательно заряженным стенкам, вследствие чего из электронов и положительных ионов образуются нейтральные атомы. Так как при этом процессе часть электронов — носителей — тока выходит из общего числа, то для сохранения силы тока на прежнем уровне необходимо увеличение падения напряжения на пути, лежащем в трубках, так как это увеличение дает увеличение скорости электронов сперва до потенциала возбуждения, а затем до ионизирующего потенциала.

После достижения здесь электронами скорости достаточной для ионизации взамен электронов ушедших на заряд стенок образуются новые электроны и ионы, которые и сохраняют ток на прежнем уровне. При этом процессе возбужденные атомы непосредственно после возбуждения приходят в свое нормальное состояние, испуская световое излучение. Этим и объясняется свечение положительного столба, заполняющего трубки.

Из сказанного следует, что влияние стенок в конечном счете скажется в увеличении падения напряжения на пути от анода к катоду; это падение в низковольтных выпрямителях составляет 5—10 вольт, в высоковольтных достигает 15 и даже 20 вольт.

Особенно большую роль играют стенки трубок при малых давлениях ртутных паров. Влияние стенок на работу выпрямителя кроме увеличения падения напряжения сказывается еще на увеличении зажигающего потенциала, почему к роли стенок мы возвратимся ниже.

Как видно из рис. 66, трубки обычно имеют колено, которое помимо соображений, вытекающих из фабрикации, играет роль в смысле увеличения запирающего действия в период непрохождения тока. Описанное выше влияние стенок сказывается всего более в колене, так как здесь действительный путь электронов больше чем где либо отличается от пути силовых линий и электроны уже в силу этого имеют стремление удариться о стенки и зарядить их до высокого потенциала.

Следующий опыт подтверждает это положение: если на трубку, заключающую анод, в том месте, где имеется положительный столб, надеть катушку, намотанную таким образом, что плоскость витков будет перпендикулярна оси трубки и центр витка будет также совпадать с осью трубки, то при пропускании через катушку тока будет иметь место продольное магнитное поле. Взаимодействие такого магнитного поля с электронами, двигающимися

по трубке, будет таково, что пути электронов будут стремиться закрутиться около магнитных линий, двигаясь по спирали, радиус которой будет равен:

$$R = \frac{mv}{eH}, \quad (54)$$

как показано в гл. I, 9, ч. I. Здесь m — масса электрона, e — заряд его, H — сила магнитного поля и v — скорость электрона.

Если теперь допустим, что вследствие диффузии, происходящей от упругих ударов, электроны будут иметь пути, отличные от путей по силовым линиям, а значит наклонные к магнитным линиям, то при наличии магнитного поля пути электронов приблизятся к путям, совпадающим с магнитными линиями. Ток электронов в значительной своей части теперь будет совпадать с центром трубки. Электроны сейчас не смогут уже ударять в стенки трубки. На рис. 72 и 73 (правая сторона) легко видеть, что свечение теперь будет сосредоточено также в середине трубки. Как это подтверждает и опыт, теперь падение в положительном столбе будет значительно ниже, чем в том случае, когда магнитное поле отсутствует.

Если мы теперь наклоним катушку таким образом, что ось ее будет пересекать стенку трубки, то в этом случае электроны будут ударять в стенку и заряжать ее. Падение напряжения при этом будет больше, чем при отсутствии катушки.

Остановимся теперь на влиянии давления паров ртути на падение напряжения в положительном столбе. Выше, в гл. II, 17, ч. I, было показано, что при движении электронов играет роль так называемый „средний свободный путь“. Ионизация ртути возможна лишь в том случае, если падение напряжения, проходящее на свободный путь, будет больше ионизирующего потенциала. Таким образом в случае необходимости образования новых электронов, взамен прилипнувших к стенкам, потребуется тем большее падение на всей длине, чем меньше будет длина свободного пути. То же самое будет и в том случае, если вообще при движении электронов к аноду длина свободного пути будет меньше расстояния между электродами.

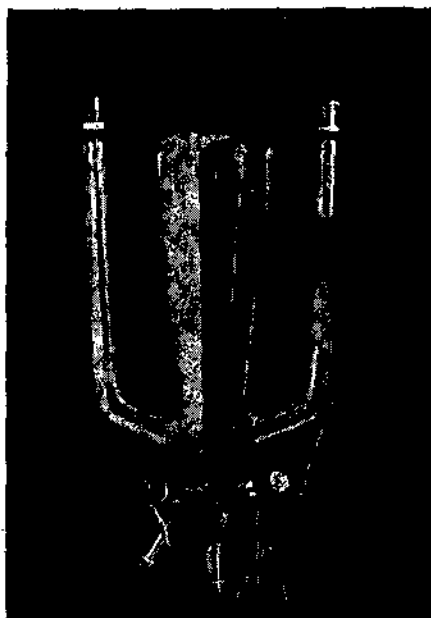


Рис. 73. Изменение вида положительного столба под влиянием магнитного поля.

9. Падение в положительном столбе.

Для величины падения напряжения в положительном столбе, не учитывая влияния стенок, получим следующее выражение:

$$V = \frac{l}{\lambda} \alpha_0 \quad (55)$$

где λ — длина среднего свободного пути, l — длина положительного столба и σ_a — ионизирующий потенциал; $\sigma_a = 10,4$ V.

Так как согласно формуле (11-а), гл. II, 13, ч. I, длина свободного пути обратно пропорциональна давлению, то, как видно из выражения (55), падение в положительном столбе будет возрастать вместе с увеличением давления паров ртути.

С другой стороны давление паров ртути весьма быстро растет с температурой, как это видно из рис. 82, поэтому с увеличением температуры быстро будет расти и падение в положительном столбе. Однако роль температуры выступит здесь лишь тогда, когда колба нагреется до температуры, при которой свободный путь будет меньше длины положительного столба.

Если принять длину положительного столба $l = 20$ см, то исходя из формулы (11-а), получим, что длина свободного пути будет меньше $l = 20$ мм при давлении около 0,01 мм, откуда из рис. 82 получим ту температуру, при которой с увеличением ее начнет увеличиваться и падение в положительном столбе. При более же низких температурах этого влияния не будет.

Если мы, теперь, составим влияние стенок на падение в положительном столбе, которое увеличивается, согласно сказанному в п. 8 настоящей главы, с уменьшением давления, а значит, и температуры колбы с влиянием температуры колбы на свободный путь, то придем к следующему заключению:

При низких температурах падение в положительном столбе будет велико, далее с увеличением температуры колбы оно будет падать, затем, как только будет сказываться влияние длины свободного пути, падение вновь будет увеличиваться, в результате чего падение напряжения в положительном столбе будет иметь U-образную форму, показанную на рис. 74.

Как мы увидим ниже, температура колбы будет приблизительно зависеть, при данном способе охлаждения и определенной поверхности колбы, от амперной нагрузки; поэтому-то такую же форму, как и приведенную на рис. 74, будет иметь и падение в положительном столбе в зависимости от нагрузки колбы.

10. Падение напряжения в колбе.

Чтобы теперь перейти к падению напряжения в колбе, включая сюда и падение на электродах, достаточно к падению, показанному на рис. 74, прибавить падение на катоде, не зависящее от нагрузки колбы, и падение на аноде, уменьшающееся с увеличением нагрузки. В результате сложения ординат кривых a , b и c получим кривую d , показанную на рис. 75.

Кривая показывает, что нагревание колбы до некоторой величины умень-

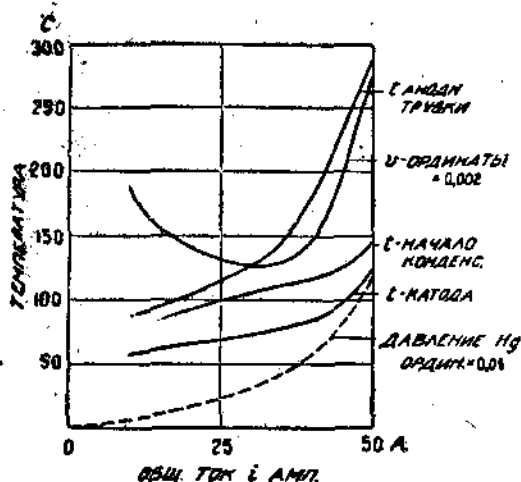


Рис. 74. Падение напряжения в положительном столбе в зависимости от температуры и т. д.

в п. 8 настоящей главы, с уменьшением давления, а значит, и температуры колбы с влиянием температуры колбы на свободный путь, то придем к следующему заключению:

При низких температурах падение в положительном столбе будет велико, далее с увеличением температуры колбы оно будет падать, затем, как только будет сказываться влияние длины свободного пути, падение вновь будет увеличиваться, в результате чего падение напряжения в положительном столбе будет иметь U-образную форму, показанную на рис. 74.

Как мы увидим ниже, температура колбы будет приблизительно зависеть, при данном способе охлаждения и определенной поверхности колбы, от амперной нагрузки; поэтому-то такую же форму, как и приведенную на рис. 74, будет иметь и падение в положительном столбе в зависимости от нагрузки колбы.

дает потери в колбе, почему с точки зрения отдачи устройства охлаждение ниже некоторой величины, отвечающей наименьшей точке кривой t , не рационально. Правда, как это будет указано ниже, при высоких напряжениях выпрямленного тока выдвигаются другие требования, заставляющие охлаждать колбы и при нагрузках меньших той, при которой получается наименьшее падение. В колбах, работающих при напряжениях до 500 вольт, обычно искусственное охлаждение вентилятором производится лишь тогда, когда нагрузка достигнет точки d на рис. 75. Включение и выключение вентилятора охлаждения здесь обычно производится помощью реле, управляемого выпрямленным током.

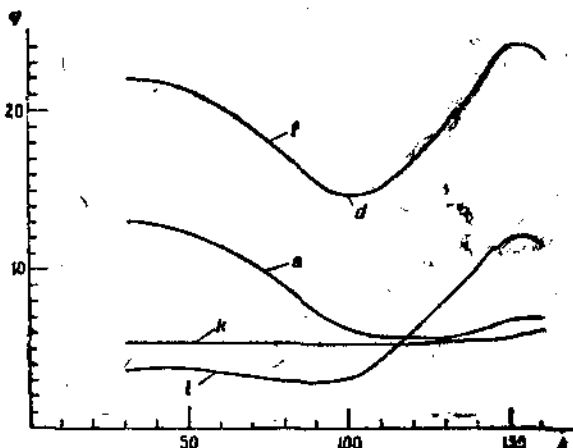


Рис. 75. Падение напряжения в колбе ртутного выпрямителя.

11. Период обратного тока.

Перейдем теперь к обстановке, которая имеется в выпрямителе для того периода времени, когда ток не должен проходить через него. Иначе говоря, рассмотрим выпрямитель во время исполнения им главного назначения — препятствовать прохождению тока в обратном направлении.

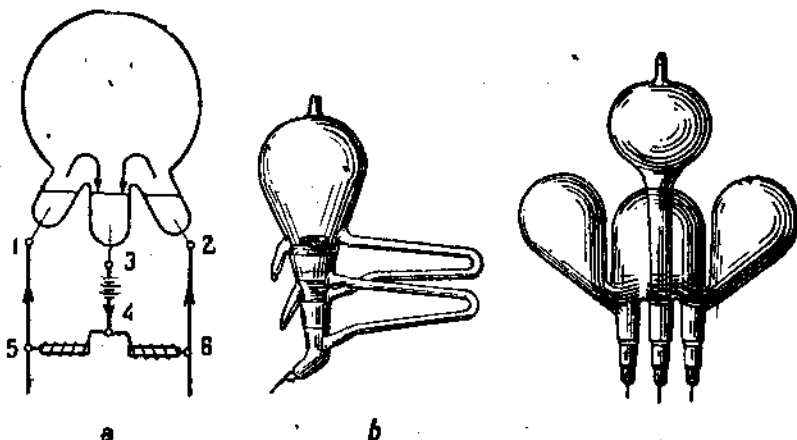


Рис. 76. Схема включения и внешний вид колб выпрямителей с жидким ртутным анодом, первоначально изготовлявшихся фирмой Schott & Gen.

Это действие в выпрямителе, имеющем общий катод для двух или нескольких анодов или фаз, будет несколько отличаться от того, которое имеет место у выпрямителя с отдельным катодом и анодом для каждой фазы. Прежде всего необходимо заметить, что выпрямляющее действие колбы зависит от „анода“ или холодного электрода, а не от ртутного катода. Если последний

играет основную роль для прохождения тока, определяя в значительной степени падение в колбе в этот период времени, а также устойчивость работы выпрямителя, то холодный внод определяет как величину того напряжения, которое может быть получено при выпрямлении, так и вообще все явления, происходящие за время запираания выпрямителем тока. В ртутном выпрямителе анод в некоторых специальных случаях может быть также из ртути, как это, например, хотя и редко, применяется в высокочастотных выпрямителях, или как это имел место в ряде первоначальных конструкций германский фирмы Schott & Gen., изготовлявшихся в 1908 г. На рис. 76 даны такого рода конструкции. Таким образом, если для катода материал играет весьма большую роль, определяя катодное падение в период прохождения тока, то для анода материал играет другую, второстепенную роль. Решающим здесь является то, что во все время работы анод должен оставаться сравнительно холодным, иначе говоря, он не должен иметь такой температуры, при которой будет проявляться в значительной степени термоионное действие. С этой точки зрения, как показывает опыт, температура анодов без нарушения вентильного действия может достигать светлокрасного каления, отвечающего 900° .

Как было сказано выше, вентильное действие имеет место на „анодах“, т. е. холодных электродах, обозначенных на рис. 66 цифрой 4, тогда, когда холодные электроды становятся катодами. Здесь имеется некоторая путаница в названиях, происходящая из-за того, что названия „катод“ и „анод“ присваиваются обычно электродам в зависимости от того, какую роль они играют по отношению к тому току, который проходит через выпрямитель и приемник и носит название выпрямленного тока, или иначе говоря по отношению к *внешнему* току. Вообще говоря, в этом смысле ток как бы выходит из ртутного электрода, имеющего светлое катодное пятно, источник электронов. Это и естественно, так как под направлением тока мы всегда понимаем направление, обратное направлению движению электронов, так как они являются носителями отрицательного заряда. В этом смысле внешний ток как бы входит в холодные электроды 4, носящее название „анодов“. Другой, более общий смысл определения „анод“ и „катод“ связан не с внешним током колбы, а с той разностью потенциалов, которая в данный момент имеется между интересующими нас электродами и вызывает ток между ними. Для удобства мы будем названия „анод“ и „катод“, связанные с внешним током колбы, ставить в кавычках, а истинную роль электрода в данный момент писать без кавычек.

Исходя из последнего определения, в период запираания тока данным электродом, которым является всегда холодный электрод, он хотя и называется „анодом“, однако по внутреннему действию он будет катодом. Таким образом вентильное действие основывается на весьма большом катодном падении, которое присуще холодным электродам. Всякие изменения холодных электродов, при которых катодное падение уменьшается, т. е. облегчается выход с этого электрода электронов, нарушает вентильное действие выпрямителя и ведет к так называемому „обратному зажиганию“, при котором ток через выпрямитель идет в направлении, обратном направлению выпрямленного тока. Однако здесь идет речь о токе весьма большой силы, превосходящей часто рабочий ток во много раз.

12. Обратный ток.

Можно было бы думать, что в период запираания через данный электрод, „анод“, совершенно не идет тока; однако это на самом деле не так: ток здесь имеет место и носит название „обратного тока“, но сила его столь незначи-

тельна, что в общем балансе потерь и при расчете соотношений между токами этот ток не играет никакой роли и ртутный выпрямитель можно отнести к „совершенным выпрямителям“.

Если так дело обстоит по отношению к внешним цепям, то по отношению к работе самого выпрямителя „обратный ток“ играет весьма большую роль, почему и необходимо разобрать те условия, от которых он зависит.

В гл. II, 21, ч. III приведены те обратные напряжения, которые существуют между анодом и катодом, или между двумя анодами, во время работы выпрямительного устройства. Как видно из таблицы 31 (стр. 134), это напряжение в значительной степени зависит от схемы выпрямления. С другой стороны в гл. IV, ч. I на рис. 14 даны зависимости, определяющие плотность тока для газа при тихом разряде в зависимости от давления и катодного падения. Исходя

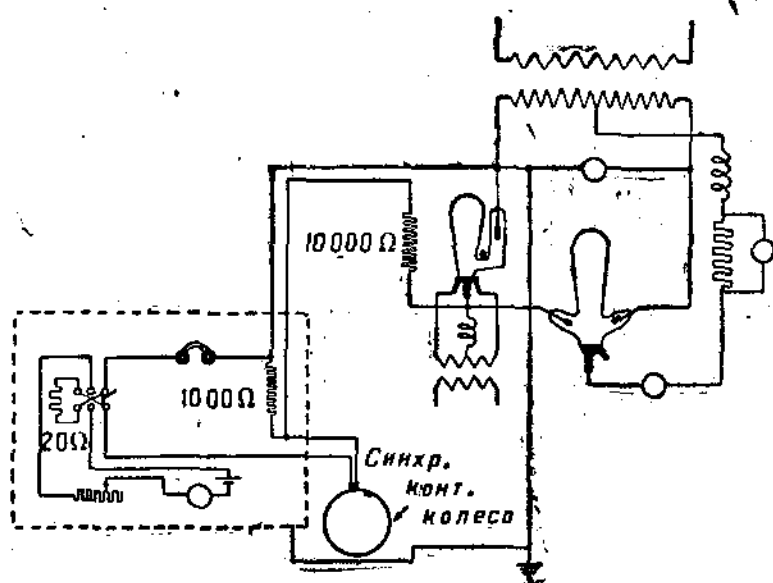


Рис. 77. Схема для определения обратных токов с помощью синхронного коммутатора.

из этих данных, возможно было бы начертить кривую обратного тока, если бы давление паров ртути, или вообще газа, вблизи анода было постоянно и не зависело ни от нагрузки, ни от каких-либо других обстоятельств. На самом деле этого нет, и это давление меняется не только от нагрузки, но меняется и по времени, в течение одного периода тока, питающего выпрямитель. Это обстоятельство играет очень важную роль в работе выпрямителя со ртутными парами. В гл. II, 24, ч. III приведены данные, касающиеся распределения давления и температуры в различных частях ртутной колбы, а также зависимость давлений от условий охлаждения. Как будет указано, эти величины являются средними, и во время работы выпрямителя происходят все время перемещения паров ртути от зон высокого давления к зонам низкого, близ холодных стенок колбы, где пары и конденсируются. Помимо этих потоков, несущих также и ионы, существуют периодические перемещения паров вдоль трубок, заключающих аноды. Эти перемещения вызываются повышениями температуры

паров в период прохождения тока и понижением в период его запаривания. Таким образом во время прохождения тока пары двигаются от данного анода к баллону и во второй период совершается обратное движение. Если за анодами имеются значительные пространства, в которых пары могут охлаждаться, то в результате этих движений анод будет интенсивно омываться движущимися парами, содержащими, как мы увидим, значительное количество монов. Тепловая изоляция пространств за анодами уменьшает это омывание, что, как увидим ниже, благоприятно отзывается на работе выпрямителя.

Как видно из сказанного, несмотря на наличие данных, дающих зависимости плотности тока от давления, построение

кривых обратного тока затруднительно, почему здесь и приходится прибегать к опыту. Определение опытным путем было произведено Гюнтершульце в 1910 г. помощью синхронного коммутатора по схеме, данной рис. 77.

На рис. 78 приведены величины этого тока для разных нагрузок выпрямителя, полученные означенным способом. Однако значительно проще получение этих кривых осуществляется с помощью осциллографа, по схеме, приведенной на рис. 79. Кривые, полученные этим путем Иссендорфом (Issendorff), приведены на рис. 80. Здесь кривая I_A дает анодный ток в период его прохождения, и кривая I_R дает обратный ток, при чем здесь

надо брать лишь ток, лежащий ниже нулевой линии. Часть кривой, лежащей выше нулевой линии, получена за счет применяемой схемы. На нижней осциллограмме получен тот же ток, но при кратковременной нагрузке, продолжительностью 0,5 сек., тогда как верхняя отвечает нагрузке, продолжающейся 10 минут, когда колба примет приблизительно постоянную температуру, и давление паров вблизи анодов будет значительно более высоким.

Из приведенных кривых видно, что максимум обратного тока наступает весьма быстро после начала периода запаривания, почти непосредственно после прекращения прямого тока, если только колба достаточно нагрета предыдущей работой и давление паров достаточно велико.

Для колбы 10 А 240 В между анодами уже через 15°, т. е. для 50-периодной колбы через $\frac{1}{1500}$ секунды, после прекращения прямого тока обратный ток достигает своего максимума, несмотря на то, что обратное напря-



Рис. 78. Кривые обратных токов.

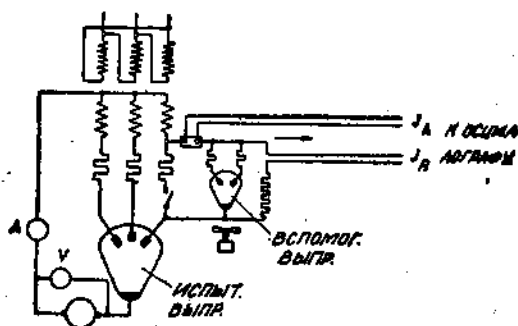


Рис. 79. Схема для определения обратных токов с помощью осциллографа.

жение при этом едва достигает 25% от амплитуды. Такой ход кривой обратного тока объясняется тем, что непосредственно вблизи анодов дуга содержит значительное количество ионов и возбужденных атомов, которые и устремляются к аноду, имеющему в период запирания отрицательный потенциал.

Из тех же кривых видно, что обратный ток весьма быстро растет с увеличением давления паров ртути в колбе, зависящем от увеличения ее нагрузки. Последнее обстоятельство прямо вытекает из соотношений, данных в гл. IV, 8, ч. I, и из кривых рис. 14. Отсюда следует, что уменьшение обратного тока может быть достигнуто путем понижения давления паров ртути вблизи анодов, например уменьшением нагрузки, путем увеличения поверхности охлаждения колбы, и более интенсивным охлаждением ее путем обдувания вентилятором. С другой стороны тот же результат получается более быстрым удалением ионов и возбужденных атомов от анода и избежанием обмывания анодов струей паров, содержащих в значительном количестве ионы и возбужденные атомы.

Для указанной цели положительную роль может сыграть упомянутое тепловое изолирование пространства за анодом, уменьшение объема этого пространства, устройство расширений в трубках, содержащих аноды, ниже анодов, и в некоторых случаях устройство стеклянных воронок вблизи анода. Однако последнее средство, принося пользу в смысле уменьшения обратного тока, весьма вредно отзывается на работе выпрямителя, особенно в радиотелеграфных установках, так как увеличивает зажигающий потенциал колбы, описанный ниже, в гл. II, 29, ч. III. Сказанное выше относится к выпрямителю, имеющему чистые электроды и столь хорошо откачанному, что присутствие посторонних газов может не приниматься во внимание.

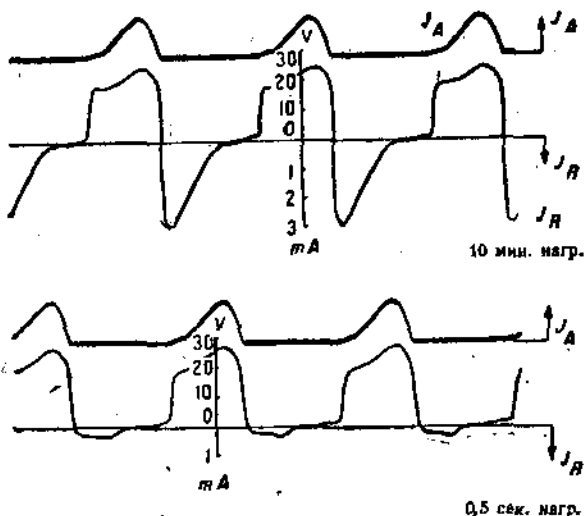


Рис. 80. Осциллограммы обратных токов.

13. Влияние посторонних газов на обратный ток.

В случае присутствия посторонних газов в более значительном количестве, их влияние сказывается в увеличении обратного тока по мере увеличения общего давления вблизи анодов. С увеличением парциального давления посторонних газов обратный ток все более и более приближается к тому, который отвечает данному газу в чистом его виде.

Позднее, в гл. II, 17, ч. III, мы увидим, что и в других отношениях посторонние газы играют весьма вредную роль в ртутных выпрямителях, в смысле же обратного тока их влияние несколько отличается от влияния паров ртути по следующим обстоятельствам.

При чистых ртутных парах в начале работы колбы, когда аноды имеют

низкую температуру, и вместе с тем и давление паров ртути в колбе мало, обратный ток, как это видно из рис. 80, мал. С нагреванием анодов он не только не увеличивается, но даже падает, так как плотность паров ртути вблизи анода, благодаря повышению температуры, падает. Обратный же ток зависит не от давления, а от плотности газа или пара вблизи анода. Далее, с течением времени после начала работы давление паров ртути в колбе повышается, вследствие чего повышается давление вблизи анодов и увеличивается обратный ток. Таким образом в случае чистой ртути при пуске колбы обратный ток мал, при нагревании же повышение температуры анодов до известной степени компенсирует увеличение обратного тока вследствие повышения давления во всей колбе.

В случае наличия посторонних газов в колбе при начале работы, т. е. при холодной колбе и анодах, плотность газа вблизи анода имеет значительную величину, превосходящую плотность пара ртути, так как газ не конденсируется, как ртуть. В этом случае обратный ток имеет большую величину и зависит лишь от посторонних газов. С нагреванием колбы начинает играть роль температура анодов, и обратный ток по своей величине приближается к тому, который имелся бы при отсутствии посторонних газов, если, конечно, их количество не очень велико.

В случае нечистых анодов обратный ток не распределяется равномерно по аноду, а часто вызывает появление светящихся точек, вспыхивающих то тут, то там. Эти точки, по мнению ряда исследователей, обуславливают обратное зажигание; однако, как показывает опыт, далеко не всегда при такого рода вспышках возникает обратное зажигание.

Сходную с этим картину дает присутствие на железных электродах мелких капель ртути, которая, испаряясь, дает на анодах ряд вспышек, не переходящих в обратное зажигание.

14. Роль обратного тока. Распыление „анодов“.

В виду незначительности величины обратного тока он не оказывает на внешнее действие устройства какого-либо влияния однако, как было уже упомянуто, имеет большое значение для работы колбы.

Как было сказано в гл. IV, 4, ч. I, обратный ток, т. е. ток при холодном катоде, происходит вследствие бомбардирования холодного электрода положительными ионами. Эта бомбардировка вырывает электроны из холодного электрода. Однако при значительной массе иона и большом катодном падении вырываются и частицы материала электрода, и происходит так называемое катодное распыление. Распыленные частицы покрывают стенки трубок сплошным зеркалом, которое распространяется на некотором протяжении ниже „анодов“. Такого рода проводящее зеркало вредно влияет, как это указано в гл. II, 30, ч. III, на работу выпрямителя, выводя его через некоторое время из строя.

Помимо распыления электродов при обратном токе, вырванные электроны, ударяясь о стекло стенок трубок, в некоторых случаях глубоко входят в него, образуя отрицательно заряженные поверхности, также вредные для работы. Такого рода электроны при дальнейшем распылении закрываются зеркалом, и в этом случае они не могут быть совершенно удалены.

Так как распыление тесно связано с обратным током, то при значительной величине этих токов покрытие стенок налетом происходит весьма быстро. С этой точки зрения уменьшение обратного тока ведет за собой уменьшение чернения стенок трубок; в виду этого понижение плотности паров ртути вблизи анодов путем обдувания колбы увеличивает ее долговечность.

Как было сказано ранее, на величину обратного тока оказывает влияние загрязнение анодов, поэтому присутствие грязи на анодах, например пота или слюны, попадающей при стеклудуговой работе, вызывает быстрое почернение анодных трубок.

Распыление при обратном токе в значительной степени зависит также и от материала анода. Железные аноды дают значительно большее распыление, чем графитовые, почему последние и применяются значительно чаще.

15. Обратное зажигание.

Непосредственно с обратным током связаны явления так называемого „обратного зажигания“. Обратный ток, в случае его увеличения с нескольких миллиампер до более значительных величин, из тока тихого разряда переходит в дугу, причем этот переход происходит чрезвычайно быстро, в течение промежутка времени порядка 10^{-5} сек. Это явление носит лавинообразный характер, обусловленный падающей вольтамперной характеристикой дугового разряда. Отличие дугового разряда от тлеющего состоит в том, как это и было указано в гл. V, ч. I, что в первом случае температура катода достигает значительной величины, причем этот раскаленный катод является источником электронов.

В некоторых случаях дуговой разряд сопровождается интенсивным испарением электродов, как например это бывает при ртутном катоде, однако это испарение электродов не является условием необходимым для существования дугового разряда, а скорее побочным, случайным обстоятельством.

Так как при дуге катодное падение напряжения уменьшается до весьма незначительной величины, составляющей несколько вольт, то в случае возникновения обратного зажигания электроды, имевшие до образования дуги падение иногда в несколько тысяч вольт, приобретают за чрезвычайно короткий промежуток времени падение всего в несколько вольт, чем обуславливается практически короткое замыкание между электродами, или, в конечном счете, оказывается накоротко замкнутым трансформатор, питающий устройство. Так как ток короткого замыкания трансформатора может достигнуть весьма значительной величины, превосходящей нормальный ток в 15—20 раз, то обратное зажигание может иметь весьма тяжелые последствия, заключающиеся при стеклянных колбах не только в перегорании предохранителей, но и в трещинах во вводах, и даже в разрушении самой колбы. При обратном зажигании нагревание холодного электрода, „анода“, производит его испарение, каковое обстоятельство способствует дальнейшему поддержанию дугового разряда.

16. Причины обратного зажигания.

Причиной возникновения дуги, или вернее перехода тлеющего разряда в дугу, служит наличие следующих обстоятельств.

1. Повышение давления паров ртути вблизи „анода“ (в данный момент имеющего отрицательный потенциал по отношению к ртутному электроду).
2. Повышение давления посторонних газов в колбе.
3. Присутствие на „аноде“ загрязнений в виде пота и т. д., особенно же в виде окисей щелочных металлов.
4. Выделение из металлического „анода“ посторонних газов, что имеет место при наличии на поверхности „анода“ тонкого слоя непроводящей окиси, при прорыве которого выделяется кислород.
5. Повышение обратного напряжения.

Первое обстоятельство может осуществиться прежде всего при увеличении рабочего тока колбы, т. е. нагрузки выпрямительного устройства, так как при этом повышается температура колбы, а значит и давление паров ртути; поэтому пределом использования колбы и является главным образом опасение появления обратного зажигания.

Такое же увеличение давления может быть следствием повышения температуры колбы при повышении температуры окружающей среды или ухудшении условий охлаждения колбы. Не нужно забывать, что обычные ртутные колбы имеют в той части, где выделяется главное количество тепла, избыток ртути, т. е. здесь мы имеем дело с парами, насыщающими пространство, и поэтому давление вблизи катода определяется уравнением:

$$\log p = 9,7522 - \frac{2863,54}{T - 19}, \quad (55a)$$

где p выражено в мм.

Ниже, в особой главе, мы подробно рассмотрим тепловой режим колбы и зависимости между обратным напряжением, нагрузкой, размерами колбы и охлаждением ее.

Повышение давления вблизи „анода“ может однако носить и местный характер, в тех случаях, когда на поверхности стеклянных трубок, выше анодов, образуются капли ртути вследствие конденсации, и эти капли, отрываясь от стенок, падают на горячий анод, где и испаряются, повышая в близ лежащем пространстве давление до пределов, при которых возникает обратное зажигание.

Такие же капли могут конденсироваться на холодных анодах ранее включения выпрямителя, а с нагреванием анодов после начала работы они испаряются, повышая давление паров в окружающем пространстве. Это повышение легко наблюдать по появлению светящихся точек вблизи капли и окружающего их сияния. Однако эти капли не служат причиной обратного зажигания, если ртуть прилипает к аноду, т. е. его амальгамирует, что имеет место при железных электродах.

Обратное зажигание возникает лишь в том случае, если капли отрываются от анода и в момент отрывания быстро испаряются, повышая давление. С этой точки зрения железные электроды более безопасны, почему в стеклянных выпрямителях их целесообразно применять при высоких напряжениях, наравне с графитовыми электродами, имеющими другие достоинства.

В тех случаях, когда обратное зажигание вызывается наличием на анодах небольших капель ртути и загрязнениями, обратное зажигание иногда ограничивается весьма кратковременной вспышкой или рядом таких вспышек, которые не дают нарушения работы устройства и прекращаются сами собой. Это имеет место главным образом в высоковольтных выпрямителях. Здесь в прекращении такого рода обратного зажигания благоприятную роль играет малое давление паров ртути в входных трубках.

17. Обратное зажигание вследствие наличия в колбе посторонних газов.

Влияние посторонних газов на обратное зажигание сказывается в неблагоприятном смысле.

Прежде всего посторонние газы увеличивают общее давление внутри колбы в тем большей степени, чем выше их парциальное давление. Отсюда происхо-

Л. В. Вольский

дит увеличение обратного тока, и этот последний легче переходит в дугу обратного зажигания. Однако при значительном давлении паров ртути, которое бывает при нагрузке выпрямителя после того, как температура ее повысилась; влияние посторонних газов не столь велико. Гораздо более значительно это влияние при самом пуске в ход колбы, когда давление паров ртути весьма мало, и в трубках, в виду больших охлаждающих поверхностей, это давление долго остается еще малым.

В этом случае посторонние газы всего чаще являются причиной обратного зажигания, потому что при пуске аноды имеют низкую температуру и плотность газа вблизи анодов будет велика, так как она будет определяться, с одной стороны, давлением посторонних газов, а с другой стороны, не будет уменьшена повышенной температуры вследствие влияния нагретых анодов. Опыт показывает, что плохо откачанные колбы дают обратное зажигание как раз при начале работы.

С нагреванием колбы и началом интенсивной конденсации на стенках паров ртути влияние посторонних газов все более и более падает еще и по следующей причине: испаряющаяся на катоде ртуть движется по направлению холодных стенок резервуара и анодных трубок, где и конденсируется; при этом ртуть увлекает за собой и посторонние газы, играя роль конденсационного насоса. Уже через несколько минут после начала работы парциальное давление в резервуаре, а особенно вблизи анодов, в анодных трубках падает до весьма низкой величины, создавая этим благоприятные условия вблизи анодов в смысле обратного зажигания. Газ, удаленный из резервуара, переносится конденсатом в ртуть, что не трудно видеть по крупным пузырькам, находящимся в ртутном катоде на стенках, после получасовой работы колбы. Эти пузырьки особенно в большом количестве собираются в электроде 2, рис. 66, назначенном для пуска колбы в ход, так как в этом электроде ртуть не испытывает той циркуляции, которая имеет место в катоде, вследствие быстрого движения катодного пятна.

Наличие пузырьков газа на стенках ртутного катода может служить показателем плохого вакуума в ртутной колбе. Удалением посторонних газов из баллона и анодных трубок помощью конденсации паров ртути можно пользоваться при работе с плохо откачанными колбами, особенно высоковольтными, для избежания в них обратного зажигания. Для этой цели, за несколько минут до включения главных анодов в цепь высокого напряжения, пускают в ход дежурное зажигание, которое ведет при своей работе к образованию ртутных паров, увлекающих посторонние газы в ртуть, где они находятся под давлением 2—3 см ртутного столба. Этим способом возможно понизить давление посторонних газов с 10^{-2} до 10^{-3} мм ртутного столба.

Кроме описанного выше влияния посторонних газов на обратное зажигание, они при железных электродах образуют на анодах окислы, которые, как было описано выше, легко становятся точками с весьма интенсивной электронной эмиссией, понижаящей катодное падение при обратном напряжении, что влечет за собой обратное зажигание.

18. Загрязнение стенок колбы вследствие присутствия посторонних газов.

Посторонние газы, особенно кислород воздуха, образуют окислы железа, которые расплываются и дают с ртутью маслообразную клейкую массу, которая смачивает как стекло, так и железо. При этом на анодах скопляются большие

капли ртути, повышающие при испарении ртути давление. В этом случае в высоковольтных колбах возможно образование обратного зажигания, которое, в отличие от обратного зажигания, вызываемого самими посторонними газами, происходит через 2—3 минуты после пуска в ход выпрямителя, когда поднимается общее давление паров ртути в колбе, а также начинают прогреваться и аноды.

Опасность такого рода обратного зажигания может быть замечена ранее, вскоре после пуска в ход колбы, по образуемому около крупных капель ртути на аноде сиянию, обусловленному повышением в этом месте давления паров ртути. Это сияние с нагреванием делается все более интенсивным и распространяется в ширину, после чего часто переходит в обратное зажигание, выводящее устройство из строя или иногда приводящее к кратковременной вспышке.

Упомянутое выше образование маслообразной ртути имеет ряд других неприятных сторон, которые будут описаны позже. На рис. 81 показана колба, стенки которой покрыты зеркальной поверхностью, образованной этого рода массой.

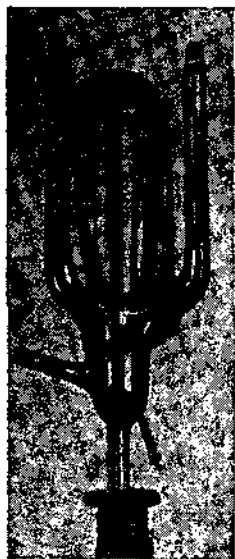


Рис. 81. Колба ртутного выпрямителя, на стенках которой образовались зеркальные поверхности.

19. Образование обратного зажигания от грязных анодов. Обработка анодов.

Образование обратного зажигания вследствие загрязнений анодов происходит потому, что, как было сказано ранее, катодное падение зависит от материала. В таблице 7 были приведены величины катодных падений для разных материалов. Такие материалы, как окиси натрия, щелочных и щелочно-земельных металлов уже при сравнительно низких температурах дают значительную эмиссию, почему, в случае присутствия их на анодах, они легко становятся точками, на которых идет более интенсивная эмиссия, катодное падение понижено, в виду чего разряд здесь легко переходит в форму дугового, образуя обратное зажигание.

Самый механизм обратного зажигания заключается в том, что в тех местах, где имеется загрязнение на аноде, плотность обратного тока увеличивается, что ведет к повышению температуры анода в месте загрязнения. Так как загрязнение дает более высокую эмиссию электронов, чем чистая поверхность, то это обстоятельство еще более способствует увеличению здесь плотности тока и дальнейшему нагреванию, которое ведет к испарению сравнительно летучих составных частей загрязнения. При этом давление вблизи анода повышается, опять-таки увеличивая обратный ток. Этот процесс заканчивается образованием светлого пятна на аноде, источника электронов, и таким образом дуга обратного зажигания готова. Весь этот неустойчивый процесс проходит в сотые доли секунды, нарастая чрезвычайно быстро, как лавина.

Как указывалось, загрязнение, вызванного прикосновением потной руки, часто достаточно для того, чтобы данный анод дал обратное зажигание. Отсюда следует, что при изготовлении выпрямителя, аноды должны тщательно прокаливаться как до их запайки в колбу, что делается или в вакууме или в водороде, так и при откачке путем нагревания анодов высокой частотой или же

пропусканием тока через колбу. В последнем случае стенки трубок более обильно покрываются распылением, однако в том случае, если нагревание индуктивным путем идет быстро, не выжидая удаления выделившихся при прокаливании посторонних газов, то и здесь имеет место сильное распыление.

Это прокаливание также необходимо для удаления газов, находящихся в анодах, которые при недостаточном их удалении, при работе выпрямителя и нагревании анодов, будут, хотя и медленно, но выделяться, понижая вакуум до вредных пределов. Иногда выделение газов идет столь быстро, что анод покрывается рядом светящихся точек, окруженных сиянием, в местах выделения газа. При прокаливании температура анодов должна быть доведена до такой величины, которая лежит выше температуры, принимаемой анодом при наибольшей возможной нагрузке.

Влияние посторонних газов на обратное зажигание сказывается также и косвенным образом, вследствие повышения температуры колбы, а значит и давления паров ртути, и вследствие больших потерь в колбе, содержащей посторонние газы, что будет показано в одной из следующих глав.

20. Влияние нагрузки на обратное зажигание.

Выше были освещены причины обратного зажигания, лежащие вне условий нагрузки, или анергие вне зависимости от степени использования данной колбы. Чтобы подойти к зависимости обратного зажигания от нагрузки, рассмотрим три вопроса:

1) величину обратного напряжения между электродами колбы при той или другой схеме включения колбы и при том или другом характере нагрузки выпрямительного устройства;

2) зависимость обратного зажигания, или вообще возникновения дуги между электродами в парах ртути, от давления этих паров, расстояния между электродами и температуры;

3) распределение температур и давлений в колбе при разных нагрузках и различных условиях охлаждения колбы.

21. Обратное напряжение.

Величина обратного напряжения, вызывающего обратное зажигание, как было сказано выше, зависит от схемы включения и характера нагрузки. Для обратного зажигания имеет значение максимальная величина суммы всех электродвижущих сил, действующих в обратном направлении по отношению к выпрямленному току в контуре, проходящем от анода к катоду.

Для выпрямителя, работающего не на емкость, эта обратная электродвижущая сила может быть принята приблизительно равной

$$E_r = E_m + V_g \quad (56)$$

Для устройств, работающих на емкость, как например выпрямительные устройства, назначенные для питания радиостанций, обычно имеют место при пуске в ход перенапряжения, равные:

$$\Delta e_c = V_g e^{-\frac{3}{4} \pi} \quad (57)$$

как это показано в гл. I, 8, ч. IV.

Для этого случая обратное напряжение можно принять равным:

$$E_r = E_m + V_g \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (58)$$

В тех случаях, когда фильтр выпрямительного устройства и характер нагрузки неблагоприятны в смысле перенапряжений и не принимается никаких мер к их избежанию, возможны перенапряжения, приблизительно равные 100%, от E_m , и тогда за наибольшую возможную величину амплитуды обратного напряжения можно принять:

$$E_r = E_m + 2E_m = 3E_m. \quad (59)$$

Значительно более интересно дать обратное напряжение в зависимости от постоянной составляющей выпрямленного напряжения V_g , так как в этом случае можно видеть сравнительное достоинство той или другой схемы, в смысле требуемой установленной мощности.

В таблице 31 даны значения обратного напряжения в единицах V_g , причем первый столбец отвечает устройству, работающему на конденсатор в самых неблагоприятных условиях, т. е. с перенапряжениями $\Delta e_c = 100\%$ при включении устройства, а второй столбец отвечает работе устройства без перенапряжений. Третий столбец дает значения напряжений не между анодом и катодом, а между двумя анодами.

ТАБЛИЦА 31.

Число фаз и схема	Максимально вольт, при $V_g=1$, между электродами см. рис. 66		
	4—3		4—4'
	$k_a = \frac{E_r}{V_g}$ при включении	$k_b = \frac{E_r}{V_g}$ при работе	$k_c = \frac{E_r}{V_g}$ при работе
1 фаза (1 анод)	9,4	6,30	—
1 . (2 анода)	4,7	3,10	3,10
3 фазы (3 анода)	3,6	2,40	2,10
6 фаз (6 анодов)	3,1	2,10	2,10
6 . (каскад 3×2)	1,8	1,05	1,05
6 . (схема Гретца)	1,6	1,05	1,05

Так как обратное напряжение для некоторых схем имеет большую величину между анодом и катодом, то обратное зажигание в этих случаях и возникает между ними и затем перекидывается на электроды 4—4', создавая короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора. Возникающий при этом ток ограничивается лишь рассеянием трансформатора и анодных реактивных катушек, если они имеются, и в виду этого может достигнуть больших величин. Из таблицы 31 видно, что чрезвычайно неблагоприятны схемы с двумя анодами и еще более малоупотребительная схема с одним анодом. При схеме с двумя анодами, при постоянной составляющей выпрямленного напряжения в 10 000 вольт, колба испытывает максимальное обратное напряжение 31 000 вольт, а при включении на емкость даже 47 000 вольт.

Полученное из ур-ия (59) и из таблицы 31 обратное напряжение не должно, при надежной работе устройства, повести к образованию между электродами — при холодном катоде, которым будет электрод 4, рис. 66, носящий название „анода“ — дугового разряда. Так как только дуга дает значительный ток, дающий же разряд практически незаметен, то образование дуги носит название пробоя между электродами.

22. Пробивное напряжение для паров ртути.

Здесь нас интересует зависимость пробивного напряжения от амперной нагрузки колбы или, иначе говоря, от давления паров или от температуры. Для

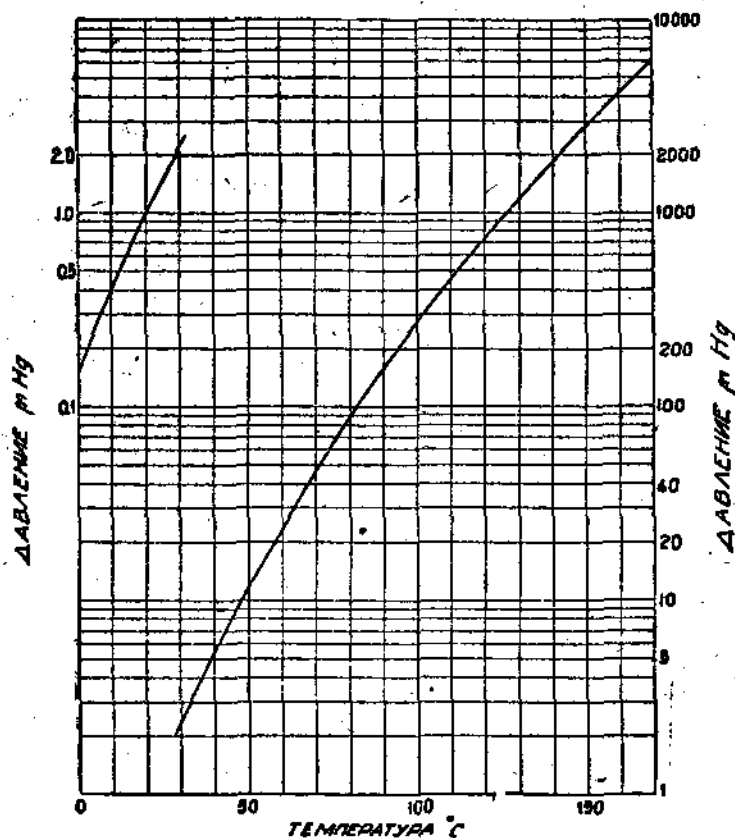


Рис. 82. Зависимость давления паров ртути насыщающих пространство от температуры.

большой ясности этого вопроса на рис. 82 приведена зависимость давления паров ртути от температуры для паров насыщающих пространство.

В гл. II, ч. III мы дадим зависимости температуры от нагрузки той или другой колбы.

Из рис. 82 видно, что давление быстро растет с увеличением температуры, будучи весьма малым при 30°, велико при 100°.

Зависимость пробивного напряжения от температуры при парах, насыщающих пространство, исследовалась рядом авторов для выяснения влияния тех или других электродов, расстояния между ними, того или другого тока и т. д. Для этой цели электроды помещались в трубку, которая нагревалась до той или другой температуры, причем расстояние между электродами могло быть изменяемо. Опыты дают в некоторых отношениях неоднородный материал. Так расстояние между электродами дает неодинаковые зависимости. На рис. 83 представлены данные, полученные Прэнсом (Prince) для переменного тока, для различных

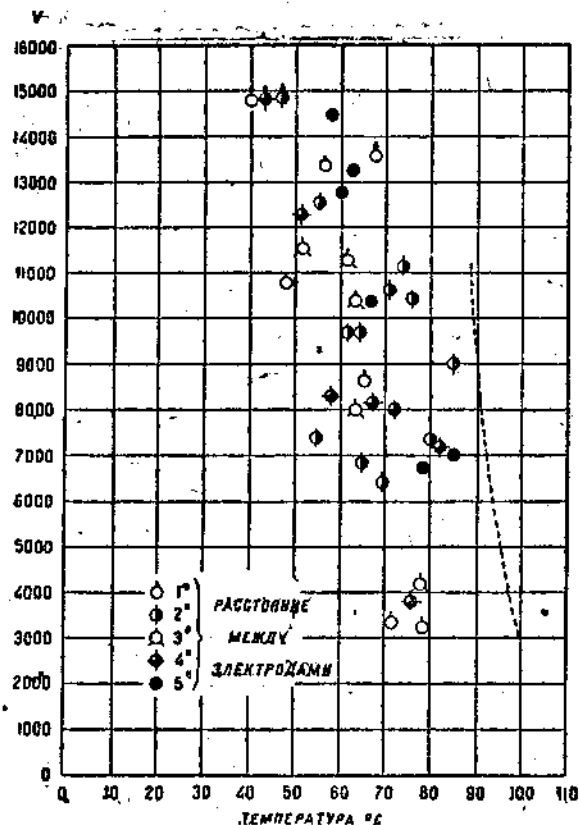


Рис. 83. Пробивное напряжение в парах ртути при различных температурах и различных расстояниях между электродами.

расстояний между электродами. Из опытов можно заключить, что расстояние между электродами играет весьма малую роль, так же точно как пробивное напряжение не зависит практически от размеров электродов и наличия ионизации. При повышении температуры до 50—60° пробивное напряжение быстро падает, что конечно зависит от быстрого повышения давления, как это следует из рис. 82.

23. Влияние анодных трубок на пробивное напряжение.

Чтобы перейти от пробивного напряжения между электродами, находящимися в одном резервуаре, при отсутствии влияния стенок, к напряжениям, которые будут иметь место в действительных условиях работы выпрямителя, где электроды часто заключены в длинные трубки, необходимо учесть два обстоятельства:

1) влияние стенок трубок, особенно при наличии в них колен, как это делается в высоковольтных колбах, и

2) переменную температуру и давление в различных частях колбы.

Длинные, изогнутые трубки, в которых помещаются аноды, увеличивают то напряжение, при котором возникает обратное зажигание, иначе говоря, делают работу выпрямителя более надежной. При ртутных выпрямителях, назначенных для выпрямления высоких напряжений, порядка 10^4 вольт, длина трубок от колена до анода достигает 200 миллиметров. На рис. 84 показан выпрямитель, предназначенный для получения до 12 000 вольт выпрямленного напряжения. Главную роль длинные трубки с коленом играют при первоначальном включении

выпрямителя, когда аноды имеют низкую температуру. Как видно из черт. 85, где кривая *a* относится к горячим, а *b* к холодным анодам, опасность обратного зажигания при холодных электродах значительно больше. При длинных трубках струя паров ртути не достигает анодов в начале работы. Ниже мы коснемся этого вопроса более подробно. Однако кроме этой роли влияние длинных, изогнутых трубок сказывается еще в том, что на стенках трубок, как было оговорено ранее и подробнее будет указано в гл. II, 30, ч. III, оседают электроны, создавая отрицательные заряды, оказывающие благоприятное действие в смысле уменьшения обратного тока. Влиянием зарядов на стенках или на искусственных поверхностях, заряжаемых надлежащим образом, пользуются для уменьшения опасности обратного зажигания, как например это имеет место в одном из патентов фирмы Броун-Бовери.

24. Распределение температуры по колбе и влияние его на работу колбы.

Распределение температуры на выпрямительной колбе играет очень важную роль, без рассмотрения которой совершенно непонятно действие высоковольтных колб, которые могут применяться, как показывает мой опыт, для напряжений, доходящих до 30 000 вольт. В виду сказанного рассмотрим этот вопрос подробнее. Как видно из всего сказанного ранее и вообще из поверхностного рассмотрения ртутной колбы,

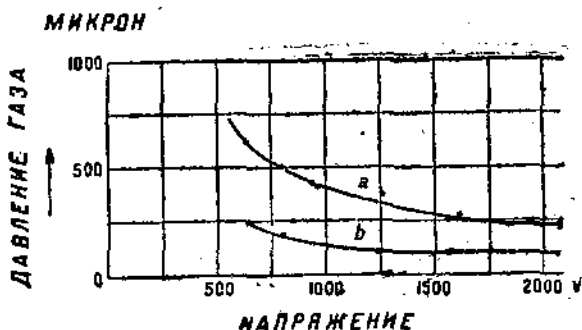


Рис. 85. Зависимость напряжения обратного зажигания от давления при различных температурах анодов.

катода мы всегда имеем пары ртути, насыщающие пространство и поэтому их давление может быть определено уравнением

$$\log p = 9,7522 - \frac{2863,54}{T - 19},$$



Рис. 84. Внешний вид стеклянной колбы ртутного выпрямителя на 12 000 В выпрямленного напряжения.

здесь мы имеем прибор, действие которого основано на следующем: катодом является ртуть, на поверхности которой и находится светлое пятно; так как значительная часть потерь лежит на катоде, как-было сказано выше, то с этим обстоятельством связано неизбежное испарение ртути. Количество ртути не может быть очень малым, особенно при больших токах, чтобы не вызвать нагревания стенок колбы вблизи катода. Отсюда следует, что вблизи

(где p выражено в мм) или графиком рис. 82. Из графика видно, что уже при температуре в 65° мы имеем значительное давление, равное 32 микронам Hg. С другой стороны, кривая пробивного напряжения рис. 83 показывает, что уже при давлении в 150 микрон, отвечающем (рис. 86) температуре 90° для паров ртути, насыщающих пространство, между холодными электродами, тлеющий разряд переходит в дугу приблизительно при 7000 вольт. Иначе говоря, если весь выпрямитель будет иметь одинаковую температуру и давление и везде пары будут насыщать пространство, то совершенно невозможно построить выпрямитель на сколько-нибудь значительный ток и напряжение в несколько десятков тысяч вольт. На помощь здесь приходят два обстоятельства: неравномерное

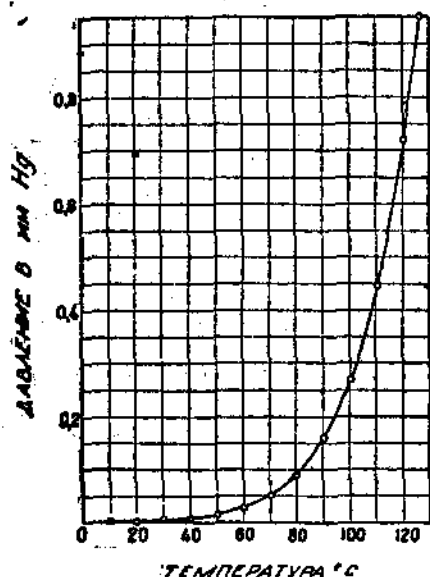


Рис. 86. Зависимость „давление—температура“ для паров ртути.

распределение температуры в разных частях колбы и то, что в некоторых частях пары не насыщают пространства, т. е. что давление связано с температурой уравнением:

$$pv = RT \quad (59a)$$

В зависимости от различных температур отдельных частей колбы в ней имеет место и различное давление. Возможность такого положения может существовать благодаря двум обстоятельствам:

1) за счет динамического равновесия, наблюдаемого в колбе, при котором значительная разность давлений в разных частях может существовать за счет движения струй паров ртути от горячих частей колбы к холодным, где они и конденсируются, поддерживая непрерывность движения;

2) за счет малого давления паров ртути в колбе, при котором значительно легче реализовать различие в давлениях в отдельных частях при посредстве перемещения струй паров ртути.

Указанные выше обстоятельства позволяют в высоковольтных выпрямителях иметь даже у анодов весьма малые плотности паров, так как здесь возможно иметь при высоких температурах пары, не насыщающие пространство.

Вот эти-то обстоятельства и дают возможность реализовать высоковольтные колбы. В них у катода пары насыщают пространство, и температура велика, а значит велика и плотность. У анода пары не насыщают пространства, температура может быть велика, но плотность мала, так как давление здесь будет определяться не кривой рис. 82, а прямой, построенной по уравнению (59-а).

В соответствии с малым давлением здесь и малой плотностью может быть получено отсутствие образования дуги при весьма больших обратных напряжениях.

Распределение давлений внутри колбы может быть определено, исходя из того положения, что везде, где на стенках ртуть конденсируется, там имеет место давление паров, насыщающих пространство, отвечающее данной температуре. На рис. 87 показано распределение температуры и давлений для 100-амперной колбы при 20 амперах (правая половина) и 30 амперах (левая поло-

вина). (Этот рисунок заимствован из книги Гюнтершульце.) Из рисунка видно, что давление от ~ 280 μ внизу баллона доходит до 13,5 μ вверху его. На трубках конденсация начинается внизу, у загибов, при температуре около 105°. Вблизи же анодов во время работы температура велика, но пары не насыщают пространства, почему плотность их мала при нагретых анодах.

Если исходить для данной колбы из сечения в узкой части колбы 85 см³, то, принимая во внимание плотность паров ртути здесь 190×10^{-3} г/см³, получим для скорости пара в этом сечении $1,34 \times 10^3$ см/сек. При охлаждении колбы вентилятором и нагрузке не в 30 ампер, а в 100 ампер, получим для скоростей величины в 3,3 раз, больше, иначе говоря $4,5 \times 10^3$ см/сек.

Такого же рода струя пара имеет место и в анодных трубках, но только она имеет не столь большие скорости. Эта струя всасывает посторонние газы в верхнюю часть колбы, а в анодных трубках газы нагнетаются к анодам. Однако, как было указано ранее, конденсирующаяся ртуть увлекает газы в ртуть катода, почему условия работы анодов, в смысле присутствия посторонних газов, улучшаются.

Таблицей 32 дано распределение температур и давления в колбе на 100 ампер, работающей обычно с вентиляцией.

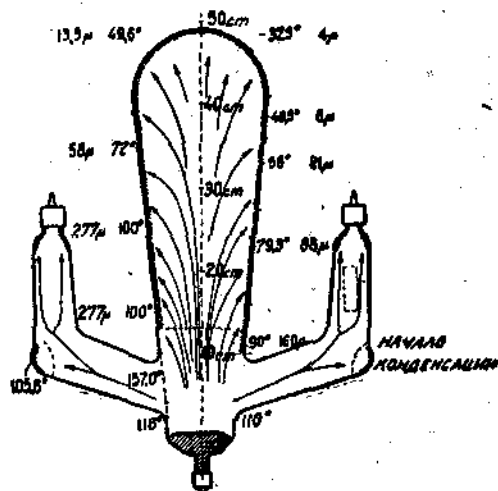


Рис. 87. Распределение температур и давлений для 100-амперной колбы.

ТАБЛИЦА 32.

Выпрямительная колба на 100 А с охлаждением вентилятором.

(Опыт произведен на постоянном токе без охлаждения.)

Сила тока, ампер	Падение напряжения при прохождении через газ, вольт на 1 см	Температура			Давление пара в анодных трубках, мм Hg
		стенки анодных трубок °C	места конденсации в коленях трубок анодов °C	катода, °C	
10	0,370	87	80	58	0,092
20	0,276	103	92	64	0,148
30	0,252	125	106	73	0,320
40	0,293	181	121	84	0,580
50	0,580	295	151	134	0,40

На рис. 87 дано изменение температур с нагрузкой колбы, а кривой рис. 74 дано изменение падения напряжения в колбе. Из последней кривой видно, что сперва это падение велико, а затем оно уменьшается, достигает

минимуму и затем опять увеличивается; причиной этого является влияние стенок; при малом давлении паров это влияние весьма велико и оно падает с увеличением давления. Кроме того при увеличении давления паров ртути увеличивается число ударов электрона, а следовательно увеличивается падение напряжения. При малых давлениях преобладает первое влияние, а при больших начинает преобладать второе.

25. Определение температуры колбы.

Как видно из сказанного, давление паров ртути играет решающую роль при определении того обратного напряжения, которое дает обратное зажигание, поэтому весьма важно нахождение температуры колбы при той или другой нагрузке. Для этого, с одной стороны, необходимо знать потери в колбе в функции нагрузки и с другой стороны необходимо определить теплоотдачу колбы, в зависимости от разности температур между колбой и окружающим пространством и способов охлаждения. Для температуры колбы мы можем написать:

$$t_k = t_0 + \Delta t, \quad (60)$$

где t_k — температура колбы и t_0 — температура окружающего пространства; Δt — превышение температуры колбы над окружающим пространством; для Δt имеем:

$$\Delta t = I_p R = I_p \frac{R_t}{S}, \quad (61)$$

где I_p — мощность, отдаваемая телом, в ваттах и S — поверхность колбы в см^2 .

Величину $R \cdot S$ обозначим через R_t — это будет удельное тепловое сопротивление на 1 см^2 , которое состоит из сопротивления окружающей среды и сопротивления стенки колбы.

В этом случае мы имеем формулу, аналогичную формуле Ома:

$$I_t = \frac{\Delta t S}{R_t} \quad (62)$$

Количество тепла, которое должно быть отдано в единицу времени, может быть определено в ваттах потерянной в колбе энергии из уравнения:

$$I_t = e' I_g,$$

где e' — падение в колбе, определяемое на основании данных гл. II, 10, ч. III, и I_g — выпрямленный ток или, иначе говоря, постоянная составляющая его.

Что касается удельного теплового сопротивления R_t , то оно может быть получено из следующих соображений.

Отдача тепла во внешнюю среду происходит как путем радиации, так и путем конвекции среде, омывающей колбу, чаще всего воздуху, реже воде или маслу.

С достаточной точностью можно принять, что потеря теплоты нагретой колбой будет такой же, как и для черного тела, т. е. для окружающей среды около 27° она равняется $0,001645$ ватт на см^2 на 1° . Тепловое сопротивление стекла колбы примем равным такой величине, при которой падение температуры в 10° получится при передаче каждым см^2 поверхности 1 ватта. Интересующее нас тепловое сопротивление

$$R_t = R_t' + R_t'', \quad (63)$$

где R_t' — сопротивление среды и R_t'' — сопротивление стенки колбы.

На таблице 33 даны значения удельного сопротивления R_t и R_t' , а также величины A_t обратной сопротивлению. Эти величины весьма сильно зависят от способов охлаждения. В таблице под поверхностной циркуляцией понимается такая циркуляция, при которой перемещается слой окружающей среды, непосредственно прилегающий к поверхности колбы, и под общей циркуляцией понимается лишь движение всей омывающей среды.

ТАБЛИЦА 33.
Охлаждение стеклянной колбы в различных средах.

Охлаждающая среда	Характер циркуляции	Общая теплопроводность A_t	Общее тепловое сопротивление R_t	Тепловое сопротивление охлаждающей среды R_t'
		Ватт на см ² на °C	°C на ватт на см ²	°C на ватт на см ²
Вода	Поверхностная	0,0580	17	7
Вода	Общая	0,0450	22	12
Вода	Нет	0,0260	38	28
Масло	Поверхностная	0,0250	40	30
Масло	Общая	0,0115	87	77
Масло	Нет	0,0076	131	121
Воздух	Вентилятор	0,0051	197	187
Воздух	Нет	0,0011	900	890

Из таблицы 33 видно, что водяное охлаждение действует весьма интенсивно, однако оно редко применяется, так как стекло колбы в нагретых местах легко лопается. Что касается масляного охлаждения, то масло быстро коксует в местах, имеющих высокую температуру, что служит препятствием к его широкому распространению. Сказанное выше позволяет определить температуру колбы в предположении, что все части ее имеют одну температуру, чего на самом деле нет, как это видно из рис. 87. Однако такой подход достаточен для практических задач.

В качестве примера найдем температуру колбы типа 3 ВН — 15 — 8000 греста „Электросвязь“ при полезной нагрузке в 15 ампер и токе возбуждения 4 ампера. Падение в колбе для главного тока возьмем в 30 вольт и для тока возбуждения 20 вольт.

Общие потери составят:

$$I_t = 4 \times 20 + 15 \times 30 = 530 \text{ вольт} \quad (64)$$

Поверхность колбы равна:

$$S = 6700 \text{ см}^2.$$

Для случая охлаждения вентилятором получаем из таблицы 33 для уд. теплового сопротивления:

$$R_t = 197,$$

почему из ур-ния (62) повышение температуры:

$$\Delta t = \frac{I_t \times R_t}{S} = \frac{530 \times 197}{6700} = 15,6^\circ \quad (65)$$

26. Зависимость размеров колбы от нагрузки и обратного напряжения.

Возвратимся теперь к вопросу обратного зажигания, с точки зрения той или другой нагрузки и охлаждения, а не в случае дефектов в изготовлении, т. е. не принимая во внимание влияния посторонних газов и загрязнений анодов.

При этом делаем допущение, близко совпадающее с действительными условиями для низковольтных колб и значительно отступающее для высоковольтных. Однако в последнем случае это допущение дает большой запас безопасности, почему его можно принять и здесь.¹

Имея на рис. 83 зависимость пробивного напряжения от температуры для паров, насыщающих пространство и имея зависимость (62) и таблицу 33, не

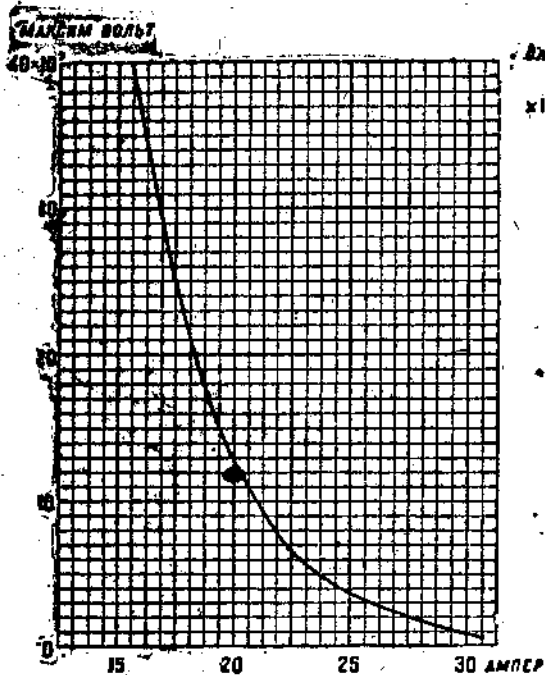


Рис. 88. Зависимость пробивного обратного напряжения от нагрузки колбы с площадью 1000 см².

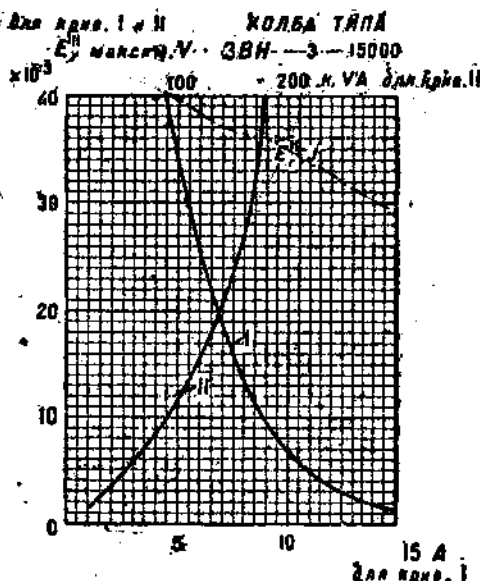


Рис. 89. Величина допустимого обратного напряжения в зависимости от нагрузки колбы (кривая I) и вольтамперы той же колбы в зависимости от обратного напряжения (кривая II).

трудно построить кривую, показывающую изменение пробивного напряжения от нагрузки колбы. На рис. 88 дана найденная экспериментальным путем зависимость пробивного обратного напряжения для колбы с площадью поверхности $S_0 = 3000$ см². Для колб с другой площадью поверхности ток должен быть уменьшен в отношении $\frac{S}{S_0}$ раз, где $S_0 = 3000$ и S площадь интересующей нас колбы.

На рис. 89 показана на кривой I величина обратного напряжения, которое может быть допущено для колбы при работе ее, независимо от схемы. Здесь

¹ Это допущение состоит в том, что мы полагаем температуры всех частей равными средней температуре.

для обратного напряжения могут быть взяты величины из таблицы 31, и определен тот ток, который при заданном выпрямленном напряжении может быть взят от данной колбы. Кривая построена для колбы с поверхностью 3000 см^2 , при температуре окружающего воздуха около 30° и хорошей вентиляции. Для колб с другой поверхностью амперная нагрузка может быть увеличена в отношении $\frac{S}{S_0}$, где $S_0 = 3000 \text{ см}^2$.

Кривая II того же рисунка дает вольтамперы колбы в зависимости от обратного напряжения для той же колбы. Эта кривая может быть использована при выборе той или другой схемы включения выпрямительного устройства.



Рис. 90. Синхронный коммутатор системы Вологодина для испытания колб на обратное зажигание.

При рассмотрении вопроса обратного зажигания мы принимали в расчет то обстоятельство, что возникновение дуги при обратном токе имеет место в тот момент, когда обратное напряжение имеет наибольшее значение, а не при максимуме обратного тока, что подтверждается опытами, для проведения которых может быть применена, например, схема рис. 77, приведенная у Прэнса.

27. Испытание колб на обратное зажигание.

Испытание колб на обратное зажигание в том случае, если оно относится к установившемуся типу, особенно низковольтному, в большинстве случаев может ограничиться контролем вакуума, для каковой цели достаточно испытание индукционной катушкой, при расстоянии между иглами разрядника 10 мм. Если при этих условиях холодная колба не даст между анодами заметного свечения, то колбу можно признать достаточно хорошо откачанной; если же замечается свечение, то при дальнейшей работе колба может дать обратное, а иногда даже не сможет быть пущена в ход.

синхронным коммутатором, показанным на рис. 90, схема включения которого дана на рис. 91.

В случае пользования этого рода коммутатором для полного испытания колбы на обратный ток и обратное зажигание, достаточно пользоваться одним трансформатором низкого напряжения, порядка 220 — 500 вольт, позволяющим развить нормальную силу тока выпрямителя, и вторым трансформатором на весьма малый ток, но рассчитанным на полное обратное напряжение. Метод этот аналогичен методу короткого замыкания и холостого хода, применяемого для испытания электрических машин. Здесь возможно наблюдать изменения обратного тока с постепенным нагреванием колбы, до самого момента обратного зажигания. Стоимость такого рода испытания при мощных колбах во много раз ниже, чем испытания полной нагрузкой в нормальных условиях.

28. Пример расчета колбы.

В качестве примера определим поверхность колбы, которая должна работать в следующих условиях:

Выпрямленное напряжение $V_g = 10\,000$ вольт, ток $I = 4$ ампера; охлаждение воздушное вентилятором; температура окружающего воздуха $t_0 = 30^\circ$; схема шестифазная двухкаскадная.

Потери в колбе I_t определяются, принимая величину падения напряжения в колбе $e' = 25$ вольт и ток возбуждения $i_0 = 4$ ампера:

$$I_t = e'(I + i_0) = 25 \times 8 = 200 \text{ ватт.}$$

Обратное напряжение из таблицы 31 для $V_g = 10\,000$ получим, принимая во внимание перенапряжение при включении:

$$E_r = 1,05 \times 10\,000 = 10\,500 \text{ вольт.}$$

Из кривой рис. 83 для $E_r = 10\,500$ вольт получим температуру колбы:

$$t_k = 55^\circ,$$

откуда

$$\Delta t = t_k - t_0 = 55 - 30 = 25^\circ.$$

Из ур-ния (62) имеем для поверхности колбы:

$$S = \frac{I_t \times R_t}{\Delta t} = \frac{200 \times 197}{25} = 160 \text{ см}^2,$$

так как из таблицы 33, для R_t имеем значение, равное 197.

29. Возникновение прямого тока. Зажигательный потенциал.

Вольтамперная характеристика.

Выше были описаны два состояния, в которых находится каждый анод ртутного выпрямителя: первое состояние, отвечающее прохождению прямого рабочего тока, и второе, когда проявляется вентильное действие прибора и идет крайне малый обратный ток. Одно состояние сменяется другим приблизительно через каждый полупериод выпрямляемого тока. Первое состояние определяет падение в колбе, т. е. отдачу прибора в силу выпрямленного тока. Второе — определяется обратным зажиганием и обуславливает допустимое напряжение выпрямленного тока. Здесь мы опишем особенности переходного момента, когда обратный ток прекращается и возникает прямой. От регулярности и устойчи-

ности этого переходного момента в значительной степени зависит работа выпрямителя. Особенно это относится к высоковольтным выпрямителям, работающим на емкость.

Для прохождения тока между анодом и катодом в прямом направлении необходимо наличие двух обстоятельств:

1. Между анодом и катодом должно быть приложено напряжение, причем анод должен быть (+) по отношению к катоду. Это напряжение может состояться из э. д. с., индуцированных как трансформатором, так и включенными в цепь анода и катода реактивными катушками:

$$\Sigma e + \Sigma L \frac{di}{dt} > 0 \quad (66)$$

2. Пространство между электродами должно быть достаточно ионизовано, и пространственные заряды должны играть роль лишь в самой непосредственной близости анода и катода. Иначе говоря, нужно, чтобы существовал „положительный столб“.

Как только осуществляется первое условие, согласно уравнению (66), то прекращается обратный ток, показанный на рис. 80; однако и прямой ток приобретает весьма малую величину, одного порядка с обратным, т. е. достигает всего нескольких миллиампер. Характер этого тока электронный, почему вблизи анода

образуется пространственный заряд, и кривая распределения падения напряжения между электродами примет вид, показанный на рис. 92, тогда как до образования пространственных зарядов это распределение имело вид, показанный на рис. 93. Если примем, что до возникновения положительного столба на пути между электродами 8 и 4 (рис. 66) длина среднего свободного пути равна λ , то, как видно из рис. 92, от одного удара до другого электрон приобретет скорость равную

$$v = \frac{dV}{dl} \lambda \quad (67)$$

До образования положительного столба, т. е. до тех пор пока не начнется массовая ионизация,

$$v < \sigma_a \quad (68)$$

где $\sigma_a \cong 10,4$ вольт. Однако, благодаря образованию пространственных зарядов при том же падении напряжения между электродами, кривая рис. 93 переходит в кривую рис. 92.

Из рис. 92 и 93 ясно видно, что если для рис. 93,

$$\frac{dV}{dl} \lambda < \sigma_a \quad (69)$$

то для рис. 92 может быть

$$\frac{dV}{dl} \lambda > \sigma_a \quad (70)$$

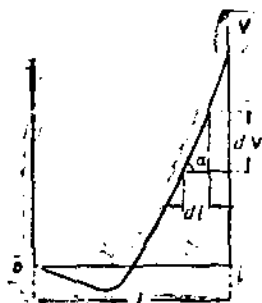


Рис. 92. Падение напряжения между электродами ртутного выпрямителя.

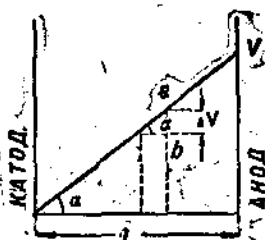


Рис. 93. Падение напряжения между электродами ртутного выпрямителя до образования пространственных зарядов.

образуется пространственный заряд, и кривая распределения падения напряжения между электродами примет вид, показанный на рис. 92, тогда как до образования пространственных зарядов это распределение имело вид, показанный на рис. 93. Если примем, что до возникновения положительного столба на пути между электродами 8 и 4 (рис. 66) длина среднего свободного пути равна λ , то, как видно из рис. 92, от одного удара до другого электрон приобретет скорость равную

В последнем случае начнется вблизи анода массовая ионизация, которая приведет к образованию положительного столба. При этом наступит второй период прямого тока. Если первый период может быть назван электронным, то второй можно назвать ионным.

Посмотрим теперь, какова будет вольтамперная характеристика колбы для анода за период прохождения тока в прямом направлении.

Для этой цели определим падение напряжения сперва до образования положительного столба, а затем и после образования.

В первый электронный период мы имеем:

- а) светлое пятно — источник электронов;
- б) свободный путь λ , отвечающий холодному пространству между трубками так как здесь нет значительного тока;
- в) напряжение между электродами, возрастающее примерно по синусоиде:

$$V = V_0 \sin \theta$$

$$\theta = 0 \text{ до } \theta',$$

т. е. до такой величины, при которой

$$V_1 = V_0 \sin \theta' = e_p. \quad (71)$$

Исходя из этих данных, мы для тока как электронного можем написать:

$$i = k V^{\frac{3}{2}}, \quad (72)$$

так как здесь решающую роль будут играть пространственные заряды (см. гл. II, 9, ч. III).

Кроме того мы имеем:

$$\frac{dV}{dt} \lambda < v_w \quad (73)$$

т. е. массовой ионизации нет.

На рис. 94 ветвь 0 — b дает кривую, отвечающую уравнению (72).

Для наглядности хода кривой рис. 94 по абсциссам отложены $\log i$, а не самые токи. После достижения точки b, пространственные заряды дадут ход падения, показанный на рис. 94, и мы получим второй период прохождения прямого тока; для этого периода имеем:

$$\frac{dV}{dt} \lambda > v_w \quad (74)$$

причем:

- а) появится массовая ионизация и положительный столб;
- б) пространственные заряды будут сосредоточены у анода и катода;
- в) падение на протяжении положительного столба будет равно:

$$V_1 \cong \frac{l}{\lambda_1} v_w \cong \frac{l}{\lambda_1} 10,4 \text{ вольты}, \quad (75)$$

где λ_1 — свободный путь в нагретом пространстве между электродами (4) — (8).

Для этого периода мы получим ветвь c — d кривой рис. 94; ординаты этой ветви будут равны:

$$e'_1 = V_a + V_k + V_1; \quad (76)$$

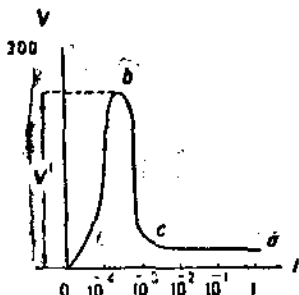


Рис. 94. Вольтамперная характеристика одного анода ртутной колбы за полупериод прохождения тока.

где V_a , V_k и V_1 — анодное падение, катодное падение и падение в положительном столбе.

Величины V_a и V_k даны в гл. II, 8, 9, ч. III, а величина e' составляет от 15 до 30 вольт. Остается выяснить величины и обстоятельства, влияющие на переход от ветви $0-b$ к ветви $c-d$, т. е. от электронного режима к ионному. Здесь, после достижения наибольшего падения V' , называемого зажигательным потенциалом или порогом, начинается зажигание дуги, ионизация, пространственные заряды быстро падают, и кроме того, в виду нагревания пространства между электродами, длина свободного пути увеличивается с λ до λ' . Это последнее увеличение обусловлено уменьшением плотности пара вследствие нагревания. В результате мы получаем неустойчивую ветвь $b-c$ переходного режима (рис. 94). В таблице 34 приведены данные для зажигательного потенциала 10-амперной колбы при искусственном нагревании до различных температур.

ТАБЛИЦА 34.

№ опыта	Постоянное напряжение на анодах вольт	Средний ток на 3-ем аноде ампер	Зажигательный потенциал e_p вольт	Давление паров ртути мм Hg
1	20,5	4,0	130,0	0,030
2	18,0	3,3	40,0	0,081
3	17,3	3,1	27,5	0,167
4	21,0	3,0	41,0	0,580
5	25,0	3,3	86,7	1,500
6	29,8	3,6	118,0	4,200
7	36,0	3,3	153,0	13,500

При описании явлений, определяющих вольтамперную характеристику $a-b-c-d$, мы не приняли пока во внимание влияние стенок, которое ска-

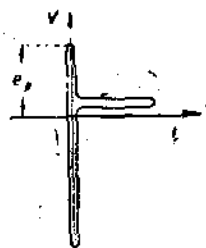


Рис. 95. Вольтамперная характеристика за весь период прохождения тока для одного анода.

зывается весьма сильно на ветви $0-b$, особенно у выпрямителей с длинными, сильно загнутыми трубками. Это влияние весьма сильно увеличивает зажигательный потенциал e_p , часто доводя его, у высоковольтных колб, до 300—400 вольт, в случае плохих колб даже до нескольких тысяч вольт, а, в некоторых случаях, совершенно препятствуя возникновению положительного столба. В следующем мы определим это влияние более подробно, теперь же покажем полную вольтамперную характеристику одного анода колбы за целый период питающего тока, т. е. за время, охватывающее как прямой, так и обратный ток. Эту характеристику наметим в линейном масштабе и получим кривую рис. 95. По оси абсцисс отложим здесь анодные токи, а по оси ординат — падение между электродами 4—8. Величина e_p есть зажигательный потенциал.

В случае отсутствия влияния стенок эта характеристика близко подходит к кривой рис. 96, отвечающей выпрямителю, работающему при повышенной частоте.

Если представить кривую напряжения, при наличии значительного зажигающего потенциала и сравнительно малого обратного напряжения не в функции тока, а по времени, то мы получим кривую рис. 97, которая дает обычную осциллограмму. Здесь точка *a* — начало массовой ионизации.

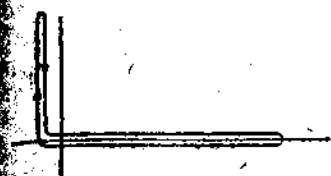


Рис. 96. Вольтамперная характеристика за весь период прохождения тока для одного анода при отсутствии влияния стенок колбы.



Рис. 97. Осциллограмма напряжения на аноде (при наличии зажигающего потенциала и при малом обратном напряжении).

30. Влияние стенок на зажигающий потенциал.

Влияние стенок на зажигающий потенциал состоит в том, что как в период обратного тока, так и в электронный период прямого тока, электроны, двигаясь от одного электрода к другому, первоначально получают направление скоростей по силовым линиям. Так как в случае изогнутых трубок силовые линии перерезаны стенками трубок, то эти стенки заряжаются электронами, и электроны, следующие за пераыми, уже отклоняются в своем пути от силовых линий и заряжают другие части трубок. Прохождение электронов по сложным загибам трубок совершается лишь за счет их отклонений при ударах об атомы ртути и отклонения заряженными стенками. В конечном счете электроны проделывают извилистый путь и попадают на противоположный электрод. Такой путь осуществляется за счет значительного падения напряжения. В том случае, если на стенках имеется налет в виде зеркала, то эта зеркальная поверхность для своего заряда требует значительного числа электронов, вследствие чего не могут образоваться необходимые для зажигания пространственные заряды, и этим увеличивается зажигающий потенциал. С другой стороны в некоторых случаях трубки могут быть покрыты сплошными зеркальными поверхностями, иногда соединенными с катодом, как это бывает у плохо откаченных выпрямителей или имеющих грязную ртуть.

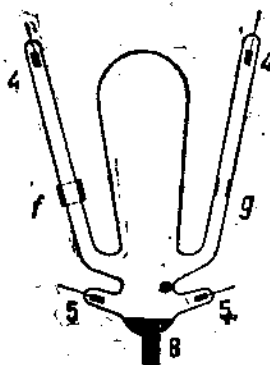


Рис. 98. Колба с обкладками или проводящими поверхностями.

В этом случае мы можем для электронного режима, т. е. для ветви 0 — *b* рис. 94, определить зажигающий потенциал, рассматривая выпрямитель, как электронный триод, роль сетки которого играет поверхность зеркала *g*, рис. 98. Пусть емкость поверхности по отношению к катоду будет C_g и потенциал, до которого она заряжена, по отношению к катоду будет V_g . В этом случае на поверхности будет заряд:

$$Q = C_g V_g.$$

Этот заряд будет оказывать тормозящее действие на электроны, движущиеся от катода 8 к аноду 4. Мерой этого торможения, как и в триоде,

будет соотношение:

$$\frac{C_g}{C_s} = D, \quad (77)$$

и для потенциала, управляющего электронами у катода, получим:

$$V_{st} = V_g + DV_a. \quad (78)$$

В том случае, когда поверхность g имеет соединение с катодом, имеем:

$$V_g = 0 \quad (79)$$

и тогда для наличия управляющего потенциала в $V = 100$ вольт получим зажигающий потенциал на аноде:

$$V_a = V \frac{1}{D} = \frac{100}{0,05} = 2000 \text{ вольт}, \quad (80)$$

так как D для нашего случая может быть принято равным 0,05.

Отсюда видно, что здесь мы получим зажигающий потенциал, равный 2000 вольт.

31. Псевдовысокий вакуум колбы.

В том случае, если поверхность g не имеет соединения с катодом, она может иметь как положительный, так и отрицательный заряды. Наибольший отрицательный потенциал ее может достигнуть величины обратного напряжения, равного — согласно таблице — для трехфазного выпрямления приблизительно двухкратному анодному напряжению, т. е.

$$V_g = 2E_m.$$

Если даже принять, что поверхность g заряжена всего лишь до 5000 вольт, то из ур-ня (78) имеем при возникновении тока

$$V_{st} = 0$$

и

$$V_a = -\frac{1}{D} V_g; \quad (81)$$

подставляя значения $D = 0,05$ и $V_g = 5000$, получим:

$$V_a = \frac{5000}{0,05} = 100\,000 \text{ вольт!}$$

иначе говоря, даже при громадных напряжениях прямой ток через данный анод не пойдет и наступит состояние псевдовысокого вакуума.

В практике такое состояние наблюдается с плохо откачанными колбами, имеющими налеты на стенках, как это показано на рис. 81. Особое значение это обстоятельство имеет при работе на емкость, почему мы и вернемся к этому вопросу в главе, относящейся к радиоустановкам для питания анодов.

32. Обкладки на трубках анодов.

Такое же действие, как и внутренние проводящие поверхности, оказывают наружные обкладки из фольги или станиоля, наложенные вблизи анодов, как это показано на рис. 98. При присоединении их к катоду получим условия,

данные уравнением (80), и данный анод не даст прохождения прямого тока в силу увеличения зажигающего потенциала и в силу того, что электроны будут стремиться к обкладке g и не будут успевать образовать отрицательный пространственный заряд вблизи анода. Если обкладку присоединить к аноду, то действие ее будет обратное, так как в уравнении (78) V_g переменит знак, и таким путем может быть уменьшен зажигающий потенциал, как это часто и делается на практике, напр. фирмой Броун-Бовери, которая снабжает поверхности трубок близ анода обкладками из лака с бронзовым порошком, которые соединены с анодами. То же самое практикуется у высоковольтных колб трестом „Электросвязь“. Эти обкладки имеют неблагоприятную сторону, так как увеличивают распыление анодов, особенно у высоковольтных выпрямителей. В смысле обратного зажигания их роль неблагоприятна, хотя и не велика.

Не трудно видеть, что снабжая все аноды выпрямительной колбы обкладками, соединяя их с катодом и сообщая им надлежащий потенциал, возможно осуществить управление колбой, пользуясь ею, как мощным нонным реле. Это и было предложено Дюнуае и Тулоном (Dunoyer et Toulon).¹

Изменение зажигающего потенциала помощью зарядов на стенках возможно помимо обкладок также и путем направления электронов на стенки или удаления их от стенок помощью магнитного поля, как это и было говорено ранее, показано на рис. 73 и пояснено в гл. II, 8, ч. III.

33. Работа многофазной колбы в целом.

До сих пор мы рассматривали работу одного анода и катода. В действительных конструкциях одна колба имеет обычно от 2 до 6 рабочих анодов и иногда ряд вспомогательных; иначе говоря, колбы делаются многофазными. Чтобы перейти к работе всех анодов и колбы в целом, перечислим основные положения, относящиеся к работе многофазной колбы.

1. Исходя из падающей характеристики колбы (рис. 75), можно принять, что в случае наличия одинакового потенциала у двух анодов, ток пойдет лишь по одному из них.

2. Общий ток катода: $i_k = \sum i_a$, где i_a — ток каждого анода.

3. Для работы колбы необходимо, чтобы мгновенное значение тока i_k было $> 2,5$ ампер. Из положения первого видно, что в случае трансформатора без рассеяния и отсутствия реактивных катушек в анодах и катодах, кривые тока анодов будут иметь вид, показанный на рис. 99, где они обозначены через 1, 2, 3 для соответствующих анодов и через 4 обозначен ток катода.

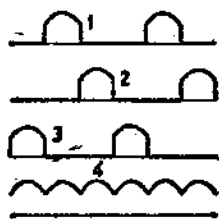


Рис. 99. Кривые токов анодов трехфазной колбы и ток катода.

Другие случаи будут рассмотрены в гл. I, ч. IV и в ч. V.

Для осуществления устойчивого светлого пятна, как было указано ранее, применяются вспомогательные электроды возбуждения 5 (рис. 66), между которыми и катодом и образуется дуга. Ток этой вспомогательной дуги поддерживается более или менее постоянным помощью реактивных катушек в анодах или катодах, действие которых описано в гл. IV, 16, ч. V.

Сила тока (средняя) при катодном дросселе порядка 0,08 генри не должна

¹ Journal de Physique, 1924, № 9, p. 257.

падать ниже 3 ампер, причем эта величина несколько варьирует, смотря по размеру колбы, от 4,5 до 2,5 ампер. Кроме того эта величина очень сильно зависит от температуры окружающей среды, как это видно из следующих цифр приведенных у Гюнтершульце.

Т а в л и ц а 35.

Температура колбы °С	Минимальная сила тока ампер	Температура колбы °С	Минимальная сила тока ампер
— 2,3	6,00	+ 23	2,95
+ 5,0	4,45	+ 70	1,95

Как видно, низкие температуры требуют большого тока возбуждения. Вообще надо сказать, что при температурах ниже $+10^{\circ}$, колба начинает с трудом зажигаться и легко тухнет, вызывая большие перенапряжения в трансформаторе и реактивных катушках, что заметно по пощелкиваниям в них. Это и понятно, так как давление паров Hg при этой температуре очень мало.

В тех случаях, когда главный ток никогда не будет падать ниже 2,5 ампер, вспомогательные электроды могут отсутствовать совершенно.

34. Пуск в ход колбы.

Пуск в ход колбы может производиться путем образования вспомогательной дуги между электродами 8 и 5 (рис. 66), однако последнее время некоторые фирмы, напр. AEG, применяют в качестве вспомогательного электрода не ртутный, а графитовый электрод, который при наклонении колбы касается ртути и при обратном движении дает вспомогательную дугу. Самое качание при больших установках производится автоматически помощью соленоида и системы реле, как это показано на рис. 100, представляющем автоматическое устройство, изготовляемое трестом „Электросвязь“ по системе автора. Схема этого устройства представлена на рис. 101.

Рис. 102 дает схему автоматического включения Броун-Бовери.

Хотя автоматический пуск и облегчает работу устройства, так как в случае потухания оно вновь зажигается и может управляться на расстоянии, что входит сейчас в общее употребление для больших установок, однако оно имеет неудобство, в виду необходимости такого крепления колбы, которое позволяло бы колбе качаться в момент зажигания. В виду сказанного, было предложено несколько систем, допускающих зажигание колбы без качания ее. Из них самая простая была предложена Купер Юнттом и применена для ртутных ламп. Для низковольтных же выпрямительных колб это устройство практически нигде еще не применялось. Оно состоит из обкладки, которой снабжена колба вблизи катода. Обкладка имеет форму кольца, как это показано на рис. 103 (ту же роль играет вспомогательный электрод вблизи катода). Если этой обкладке или электроду сообщить весьма высокое напряжение, порядка 10 000 вольт, то вблизи катода получится высокий градиент, при котором произойдет вырывание электронов из катода и сообщение им весьма высоких скоростей, при которых наступает ионизация. Получение нужного напряжения у Купер Юнтта произво-

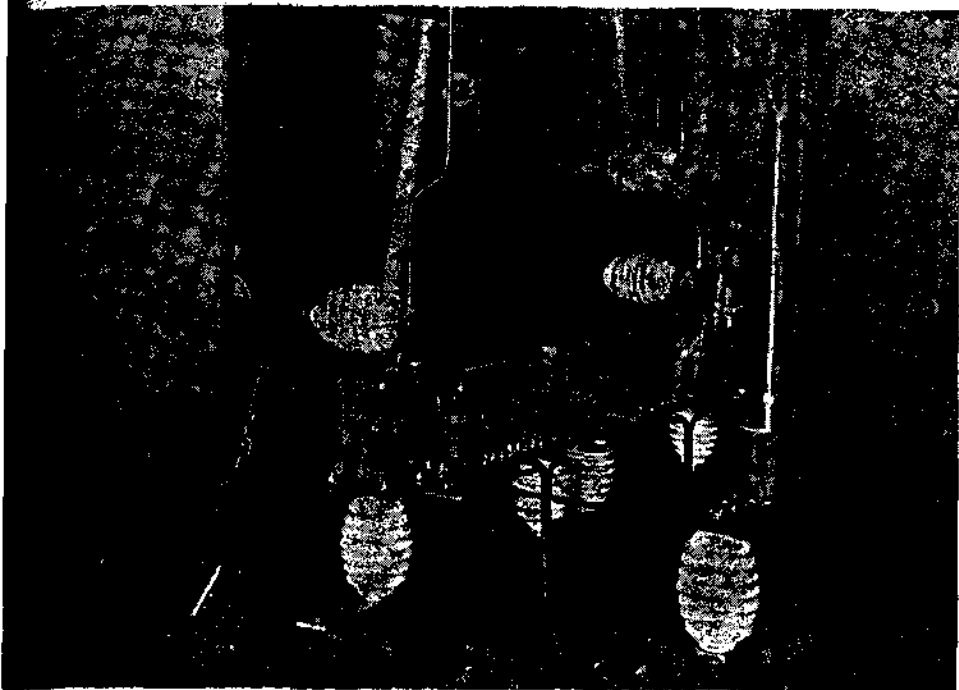


Рис. 100. Общий вид устройства для автоматического пуска стеклянного ртутного выпрямителя системы Володина.

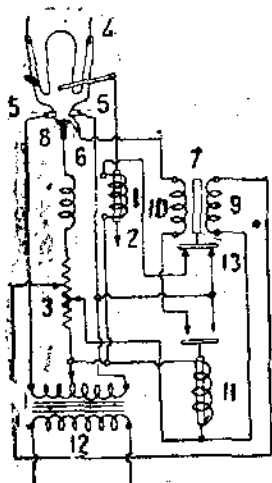


Рис. 101. Схема включения устройства для автоматического пуска стеклянного ртутного выпрямителя, системы Володина.

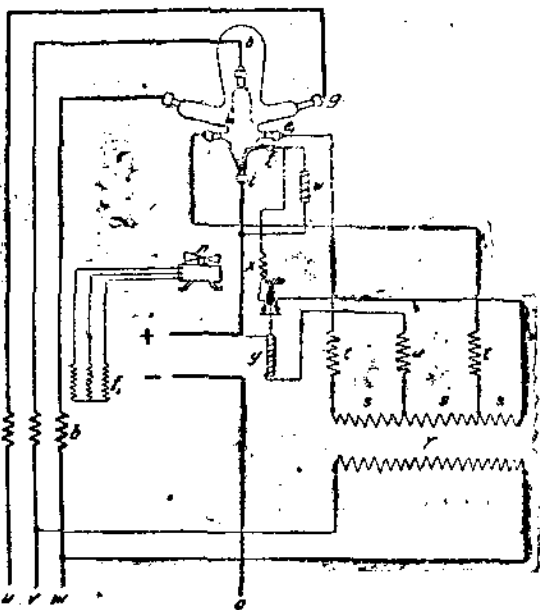


Рис. 102. Схема включения автоматического пускового устройства системы Броун-Бовери для пуска стеклянных ртутных выпрямителей.

дится экстрактором, помощью вакуумного прерывателя. Устройство, несмотря на простоту, не применяется, потому что, иногда, по трудно объяснимым при-

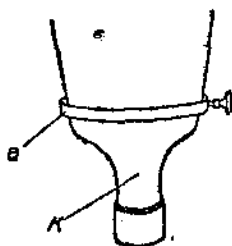


Рис. 103. Колба с зажига-
тельным кольцом у ка-
тода.

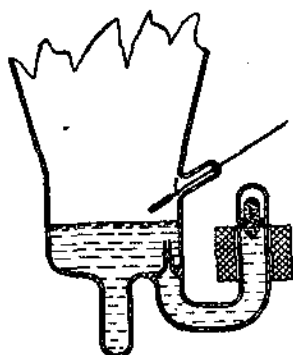


Рис. 104. Устройство для
пуска в ход колбы системы
Сименса.

чинам, зажигание происходит не сразу. Далее фирмой AEG изготовлялось устройство для зажигания, состоящее из графитового анода, укрепленного на

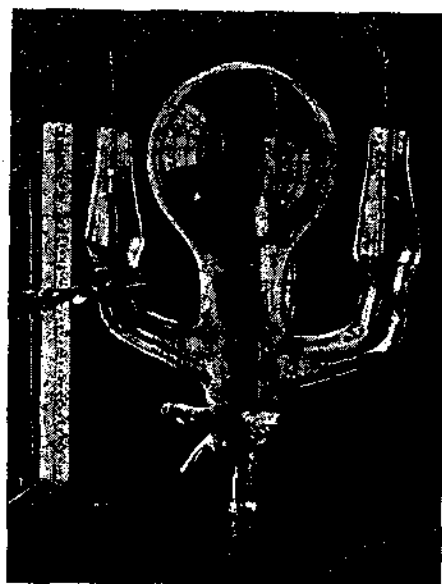


Рис. 105а.

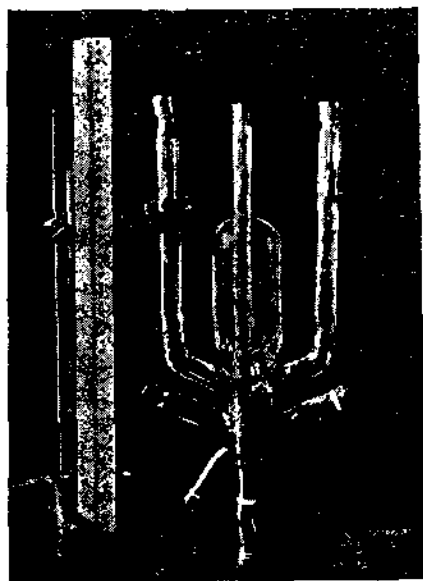


Рис. 105 б.

Типы колб стеклянных выпрямителей завода „Светлана“ ВЭО

биметаллической полоске. В холодном состоянии, т. е. при отсутствии прохо-
ждения тока по зажигающему аноду, пластинка не имеет изгиба, и анод по-
гружен в ртуть. После включения вспомогательного анода и прохождения тока,

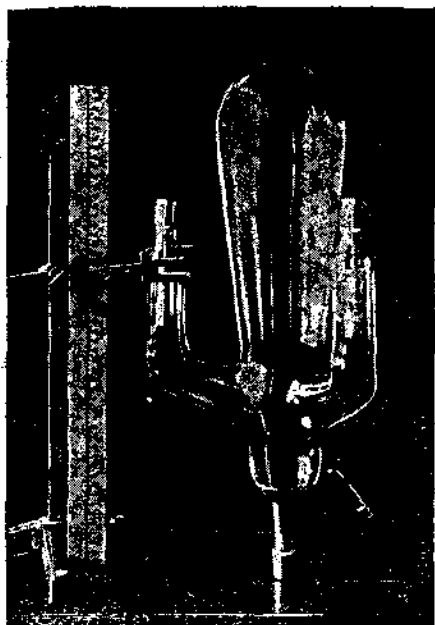


Рис. 105 с.

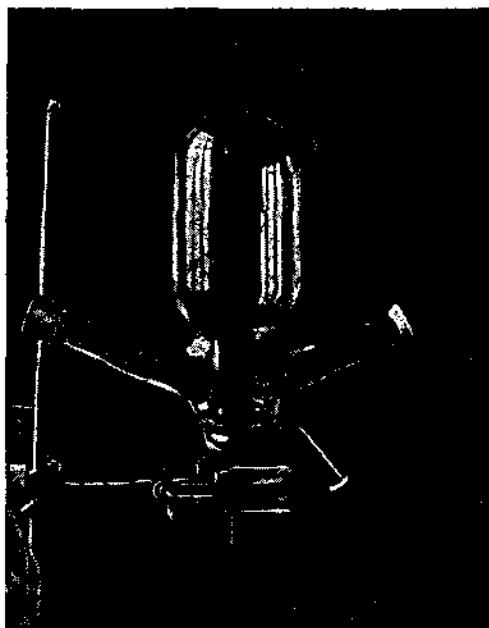


Рис. 105 д.

Типы колб стеклянных ртутных выпрямителей завода „Светлана“ ВЭО.

пластинка нагревается, при этом она изгибается, и анод выходит из ртути, создавая вспомогательную дугу. Устройство, несмотря на простоту, имеет то неудобство, что пластинка медленно охлаждается, почему в случае неудачного зажигания необходимо ждать около минуты для того, чтобы зажигание было произведено вновь. В большинстве случаев такая потеря времени недопустима.

Наконец фирма Siemens изготавливает зажигающие приспособления, основанные на том, что ртуть вытесняется из вспомогательного резервуара поплавком, наполненным железными опилками. Ртуть при этом брызжет фонтаном на анод дежурного зажигания, производя этим зажигание.

На рис. 104 показано такое устройство. Движение поплавка производится колесиком.

35. Типы колб.

На рис. 105а, б, с и д показаны типы низковольтных колб завода „Светлана“ ВЭО, разработанные автором. В таблице 36 (см. также рис. 105е) приведены характерные данные этих колб.

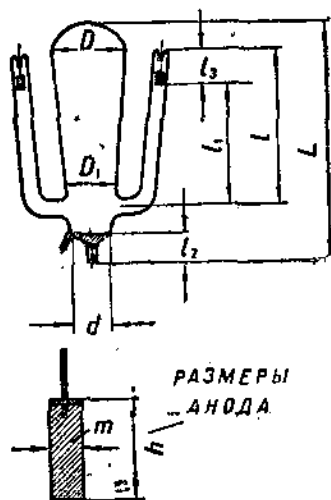


Рис. 105е (к табл. 36). Габаритные размеры колб стеклянных ртутных выпрямителей завода „Светлана“, ВЭО.

Таблица 36.

№ п/п	Т и п	Сорт стекла	Материал анодов	I_g мА	V_g мВ	D	D_1	d	d_1	L	l	l_1	h	h_1	м/с
1	2-B-6	Молибд. № 23	железо графит	6A	110	80	65	35	20	235	100	10	35	90	9/35
2	4-B-6	Молибд. № 23	железо графит	6A	220	80	65	35	20	235	100	10	35	90	9/35
3	2-B-12	Молибд. № 23	железо графит	12A	500	120	80	45	40	385	150	50	50	100	10/30
4	2-B-H-20	Молибд.	графит	20A	500	140	90	70	52	588	185	70	75	120	10/45
5	2-B-20	"	"	20A	500	140	90	70	52	588	185	70	75	120	10/45
6	3-B-15	"	"	15A	500	120	85	50	45	385	150	50	50	100	10/30
7	3-B-H-15	"	"	15A	500	120	85	50	45	410	150	50	50	100	10/30
8	3-B-H-30	"	"	30A	500	140	90	70	52	588	185	70	75	120	10/45
9	3-B-H-60	"	"	60A	500	230	115	80	60	805	240	110	70	130	10/60
10	3-B-H-100	"	"	100A	500	250	130	95	65	855	280	100	100	85	10/70
11	3-B-H-250	"	"	250A	500	325	155	125	75	725	295	170	250	85	10/70
12	3-B-H-4-3000	Молибд. № 23	железо графит	4A	3000	120	80	50	30	428	215	135	65	80	9/45
13	2-B-H-6-10000	Молибд.	железо графит	6A	10000	140	95	70	35	588	300	220	60	80	10/35
14	3-B-H-1-6000	№ 23	железо	1A	6000	80	60	40	25	428	280	205	50	85	10/35
15	3-B-H-6-10000	Молибд. № 23	железо графит	6A	10000	140	95	70	35	588	300	220	60	80	10/35
16	3-B-H-15-10000	Молибд.	железо графит	15A	10000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10/45

36. Укупорка колб.

Одним из главных недостатков ртутных колб надо считать затруднения, связанные с перевозкой колб, в виду тех ударов ртути, которые испытывают стенки колбы при тряске и перевертывании. Эти удары пагубны оттого, что в вакууме при ударе ртуть не отделена от стекла подушкой из воздуха, поэтому удар очень резок и разрушает колбу. В виду сказанного важное значение имеет укупорка, которая показана на рис. 106 и относится к колбам завода „Светлана“ ВЭО. Здесь подвес колбы пружинный, колебания демпфируются стружкой, и кроме того сама решетка имеет ножки из мягких подушек. Перевертывание колбы в укупорке недопустимо. Все укупорки колбу перевертывать надо медленно и осторожно. Несмотря на сказанное относительно хрупкости колбы, нам все же удавалось перевозить колбы на автомобиле на расстояние в 600 км, при доставке их на Тегенскую радиостанцию.

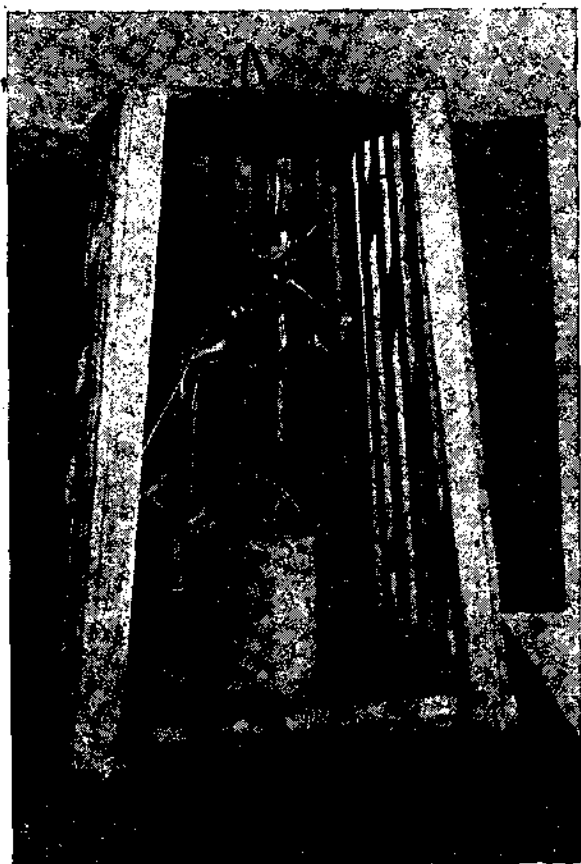


Рис. 106. Укупорка колбы завода „Светлана“ ВЭО.

37. Ртутные колбы, наполненные нейтральным газом.

Выше были описаны колбы с чистым вакуумом или вернее с чистыми парами ртути. Однако имеется ряд систем колб, в которых помимо ртутных паров колба наполнена каким-либо благородным газом, напр. аргоном, и кроме того к ртути иногда прибавлено небольшое

количество щелочного металла. Этим достигаются следующие преимущества перед чисто ртутными выпрямителями.

1. Возможность работы при весьма малых токах, порядка 0,1 — 0,3 ампера без специального вспомогательного возбуждения, так как катод, состоящий из ртути с щелочным металлом, уже при этих малых токах дает устойчивое пятно, что обусловлено большей эмиссионной способностью щелочных металлов, как это видно из таблицы 5, гл. III, 6, ч. I.

2. Несколько меньшее падение напряжения, составляющее около 15 вольт.

3. Простота ее зажигания, так как здесь достаточно приложить к зажигающему электроду напряжение в 600 вольт, которое выключается после зажига-

ния посредством реле. К недостаткам системы относится невозможность построения колбы на напряжения свыше 250 вольт, так как нормальное катодное падение для щелочного металла в аргоне, как было указано, равно всего 64 вольтам; при увеличении обратного напряжения обратный ток при этом быстро растет и переходит в обратное зажигание. Если у ртутной колбы вблизи анодов возможно, путем интенсивного охлаждения и конденсации ртути на загибах трубок анодов, получить сравнительно малое давление и плотность, то для аргона это невозможно. В этом — коренное различие систем. Этого рода выпрямители изготавливаются германской фирмой Deutsche Telephonwerke.

38. Колбы с катодом из ртути с оксидом щелочно-земельных металлов.

Возможность работать при малом катодном токе может быть достигнута для колб на малые токи, порядка 1 ампера, другим путем, предложенным автором. Для этой цели в катод вводится окись щелочно-земельного металла, например в виде колечка или спирали, покрытых этим окислом. Колба откачивается до возможно высокого вакуума, как обычная ртутная. В этом случае светлое пятно фиксируется на плавающем колечке, покрытом окислом, и ток может быть доведен до 0,1 ампера без того, чтобы колба потеряла возбуждение. Такая колба может, в противоположность аргонной, давать выпрямленный ток с напряжением в несколько тысяч вольт, не давая обратного зажигания. Пуск в ход колбы производится непосредственным включением высокого напряжения, без качания колбы. Такая колба, изготовлена в Центральной Радиолaborатории автором. Данные ее: 3000 вольт и 0,5 ампера. На большие силы тока такая система повидимому мало пригодна, так как в этом случае оксид быстро разрушается.

39. Испытание и исследование ртутных колб и выпрямительных схем.

Испытание ртутных колб касается главным образом обратного зажигания, зависящего от присутствия в колбе посторонних газов. В гл. II, 27, ч. III были даны указания относительно такого рода испытаний, кроме того были приведены схемы на рис. 77 и 79, дающие возможность определения как обратных токов, так и возникновения обратного зажигания.

Другим важным обстоятельством, отражающимся на работе колбы, особенно высоковольтной, является величина зажигающего потенциала. Как сказано в гл. II, ч. III и гл. I, ч. IV, при увеличении зажигающего потенциала выше некоторой величины наступают пропуски в токе колбы; она даже может в некоторых случаях совершенно выйти из строя. В виду сказанного высоковольтные колбы должны быть подвергнуты испытанию для определенного зажигающего потенциала. Наиболее простым способом является исследование помощью Брауновской трубки, непосредственно дающее вольтамперную характеристику, показанную на рис. 95; при этом возможно также исследование влияния тех или других факторов, меняющих зажигающий потенциал, например уменьшение зажигающего потенциала помощью обкладок, надетых на анодные трубки вблизи анодов. Схема включения Брауновской трубки и приборов, необходимых для снятия вольтамперных характеристик, показана на рис. 107а.

40. Исследование выпрямительных схем.

Исследование выпрямительных схем стеклянных выпрямителей, в смысле правильной работы отдельных колб и анодов, может быть произведено наиболее просто стробоскопическим методом: для этой цели синхронный мотор, питае-

мый от сети, дающей ток выпрямителю, снабжается стробоскопическим диском. Стробоскопический диск имеет одно или два отверстия в зависимости от синхронного числа оборотов мотора. Такие же отверстия имеются и на поворотной части стробоскопа. Рассматривая те или другие колбы данной схемы, возможно путем поворачивания неподвижной части стробоскопа определить время зажигания того или другого анода и время его потухания, так как при рассматривании в стробоскоп данной колбы возможно видеть тот или другой анод в любой момент периода переменного тока; иначе говоря, мы можем

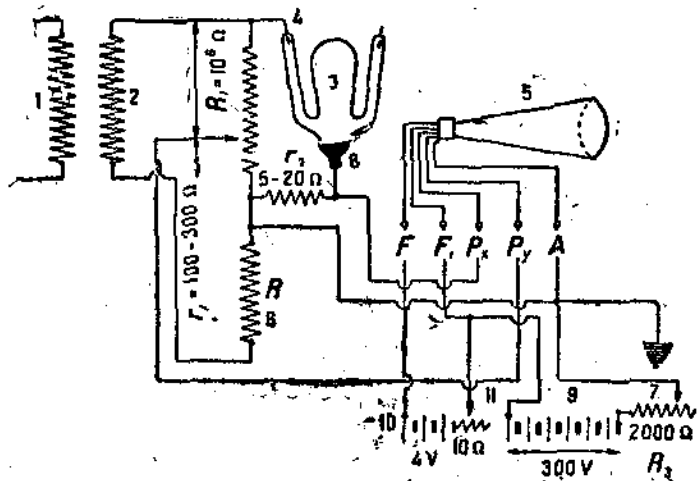


Рис. 107а. Схема включения трубки Брауна для снятия вольтамперных характеристик стеклянных ртутных выпрямителей.

наблюдать его в моменты возникновения тока, во время прохождения тока и наконец во время непрохождения.

Стробоскопическим способом возможно осуществление обследования схемы с чрезвычайно большой точностью, отвечающей одной тысячной периода. Удобство этого способа заключается также в том, что нет надобности включения каких-либо приборов в измеряемую цепь, что всегда представляет затруднение, особенно при больших мощностях и высоких напряжениях. Помощью этого метода может быть контролировано действие тех или других анодных дросселей, вызывающих перекрытие тока, действие разделительных дросселей, влияние зажигающего потенциала на прохождение тока через ту или другую базу, особенно в устройствах, работающих на фильтр. На рис. 107б показан стробоскоп, применяемый в Центральной лаборатории треста „Электросвязь“.

41. Устройство для автоматического измерения тока возбуждения при изменениях нагрузки.

Необходимость иметь в ртутной колбе ток возбуждения, поддерживающий светлое катодное пятно, источник электронов, вызывает добавочные потери в колбе. Как было сказано выше, величина тока возбуждения в среднем не должна падать ниже 3 — 4 ампер.

Так как падение в цепи возбуждения мало чем отличается от падения в цепи главного тока, то в смысле нагревания для колбы почти безразлично, является ли амперная нагрузка результатом прохождения рабочего тока или

тока возбуждения. Отсюда следует, что в тех случаях, когда рабочий ток не будет ниже 3—4 ампер, возможно обходиться без тока возбуждения. В высоковольтных колбах это дает весьма большую экономию в смысле размера колб и, до некоторой степени, в смысле к. п. д. Однако в большинстве случаев такое исключение тока возбуждения невозможно или влечет за собой большие неудобства; в виду сказанного весьма целесообразным является такого рода устройство, которое автоматически уменьшает ток возбуждения выпрямительного устройства, по мере увеличения рабочего тока свыше 3 ампер, таким образом, чтобы общий ток, идущий от катода, никогда не был ниже некоторой

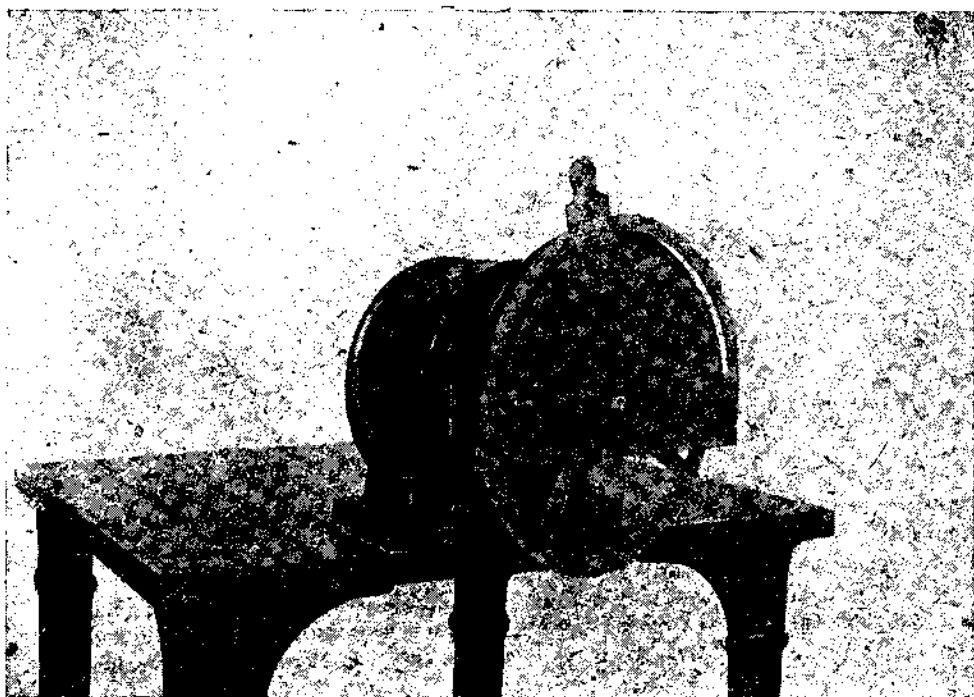


Рис. 107б. Внешний вид стробоскопа для исследования выпрямительных схем стеклянных выпрямителей.

величины, отвечающей достаточно устойчивому светлomu катодному пятну. В этом случае получается значительная экономия в смысле большего использования колбы. В качестве примера допустим, что рабочая нагрузка колбы составит 4 ампера при 10 000 вольт выпрямленного напряжения. В этом случае в больших установках мы имеем для нагревания колбы 4 ампера рабочего тока и 4 ампера тока возбуждения, т. е. в смысле нагревания колба будет иметь общую нагрузку в 8 ампер, при полезной выпрямленной мощности 40 kW. Если теперь снабдить данное устройство приспособлением, позволяющим снижать ток возбуждения при нагрузке большей 4 ампер, то при тех же потерях, а значит и той же колбе, возможно будет увеличить нагрузку колбы рабочим током высокого напряжения с 4 ампер до 8; иначе говоря, полезная выпрямленная мощность увеличится, при той же колбе и том же ее нагревании, с 40 kW

до 80 kW. Практическое осуществление уменьшения тока возбуждения может быть достигнуто, пользуясь схемой, показанной на рис 107с.

Сущность схемы состоит в том, что параллельно анодам 5, служащим для создания дуги возбуждения, приключена реактивная катушка с железом. Эта катушка должна иметь столь большую реакцию, чтобы в нормальном полсжении, отвечающем холостому ходу колбы или малой величине рабочего тока, ток, проходящий по реактивной катушке, был весьма мал сравнительно с током, идущим

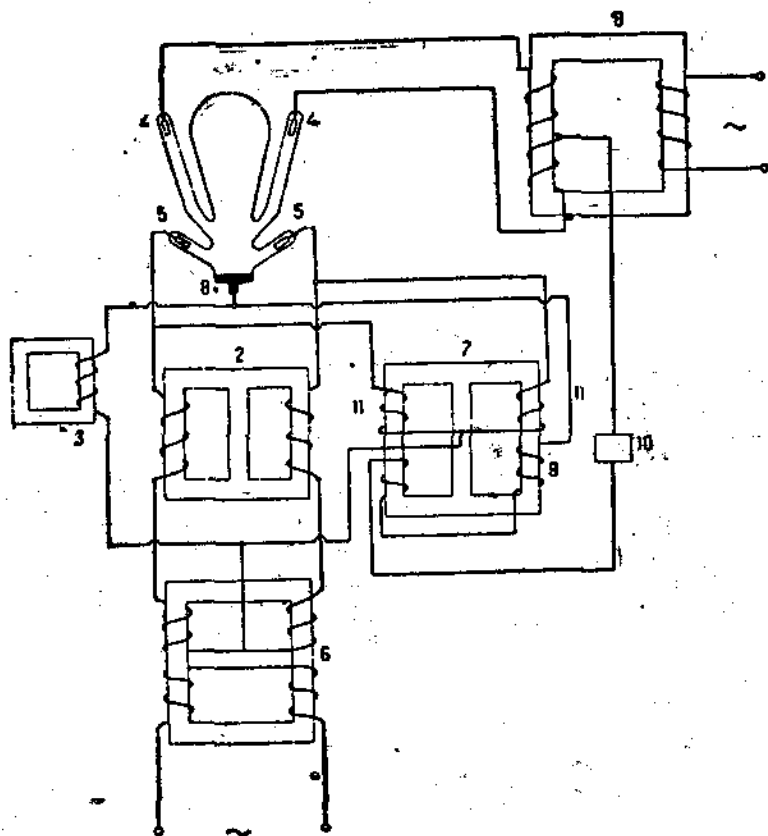


Рис. 107с. Схема включения устройства для уменьшения тока возбуждения.

через аноды возбуждения. Если теперь сердечник реактивной катушки, приключенной параллельно к анодам возбуждения, поляризовать постоянным током, то, как известно, индуктивность этой катушки, при достаточно большей поляризации, уменьшится во много раз и индуктивное сопротивление цепей, приключенных к анодам, также уменьшится, и по этой цепи пойдет значительный ток возбуждения. В виду сказанного напряжение на анодах возбуждения упадет до весьма малой величины, вследствие наличия в анодных цепях возбуждения реактивной катушки 2, подсчитанной надлежащим образом. Ток возбуждения также упадет до величины тем меньшей, чем больше будет поляризован сердечник реактивной катушки. Поляризация реактивной катушки 7 производится выпрямленным рабочим током. Благодаря последнему обстоятельству, ток воз-

буждения будет меняться в зависимости от главного рабочего тока в пределах от величины близкой к 0 до 4 ампер, при изменении рабочего тока от полной нагрузки до нуля. На рис. 107-с 2 — анодный дроссель возбуждения, 7 — дроссель, включенный параллельно цепи возбуждения, 9 — обмотка, поляризующая этот дроссель, 8 — трансформатор рабочего тока, 6 — трансформатор возбуждения, 3 — катодный дроссель возбуждения, 10 — приемник, питаемый рабочим током. Этого рода устройство разработано автором в Центральной лаборатории треста „Электросвязь“. Применение его особенно целесообразно в установках высокого напряжения, имеющих нагрузку, меняющуюся от нуля до некоторой максимальной величины, как это имеет место при телефонной и телеграфной работе.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

СТЕКЛЯННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ С ОКСИДНЫМ КАТОДОМ. (ГАЗОТРОНЫ.)

1. Преимущества выпрямителей с оксидным катодом.

К ртутным выпрямителям описанного выше типа, у которых носителем светлого катодного пятна является ртуть, непосредственно примыкают выпрямители, в последнее время широко входя-

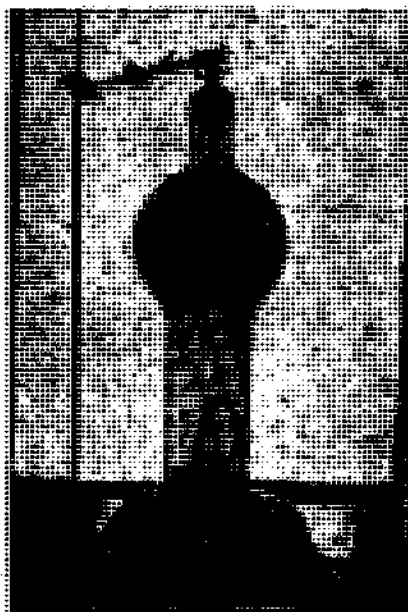


Рис. 108. Выпрямитель Rectron с оксидным катодом фирмы GEC.

щих в практику, особенно в качестве высоковольтных выпрямителей, отличающиеся тем, что здесь источником электронов служат нагретый оксидный катод. Такого рода выпрямитель соединяет в себе ряд преимуществ ртутных выпрямителей обычного типа, у которых светлое пятно находится на ртути, с преимуществами чисто вакуумных выпрямителей с нагретым катодом, — кенотронов. Перед кенотронами их преимущества состоят в высокой отдаче, высокой стоимости и малом падении напряжения выпрямительного устройства. Перед ртутными выпрямителями, с жидким ртутным катодом, они имеют преимущество в смысле меньших размеров колбы, возможности работы без искусственного охлаждения, более легком и надежном транспорте, удобстве зажигания и наконец в легкости фабрикации машинным путем.

2. Работа оксидного катода в атмосфере разреженного газа.

Однако сравнительно с ртутными выпрямителями с жидким катодом эти выпрямители имеют и недостатки, которые будут выяснены в дальнейшем изложении и перечислены ниже. Выпрямители этого типа показаны на рис. 108 и 109. Они были разработаны в лаборатории General El. Company в Америке¹

¹ У нас, в СССР выпрямители этого типа изготавливаются на заводе „Светлана“ под названием „Газотроны“.

на основании исследований Халла (Hull), который нашел, что присутствие газа при низком давлении в выпрямителе с накаливаемым катодом предохраняет катод от испарения, хотя и ведет, с другой стороны, к распылению его вследствие ионной бомбардировки. Однако последнее неудобство может быть совершенно избежано в том случае, если падение между электродами не будет превосходить некоторой критической величины, зависящей от того газа, которым будет наполнена трубка. Величина этого критического падения колеблется между 20 и 25 вольтами. При меньших падениях ион при бомбардировке катода не может приобрести скоростей, достаточных для разрушения катода. Так как при ртутных



Рис. 109. Внешний вид выпрямительной установки фирмы GEC с выпрямителями типа Rectron.

парах, требующих для ионизации всего лишь 10,4 вольта, нетрудно достигнуть в выпрямителе падения порядка 15 вольт (ибо положительные ионы будут нейтрализовать пространственные заряды), то и становится возможным работать ниже критического падения, разрушающего катод. Последнее для ртути составляет 22 вольта. Здесь мы имеем еще запас достаточной величины. Указанная выше роль ртутных паров определяет давление их, при котором и падение между электродами будет достаточно мало; вернее этим требованием определяется нижний предел давления паров Hg, который должен быть осуществлен. Более высокое давление здесь не вредно, так как не может повести к развитию ионных опасных скоростей.

3. Верхний предел давления газа в выпрямителях с оксидным катодом.

С другой стороны верхний предел давления паров ртути определяется уже не катодом, а анодом, и относится не к периоду пропускания тока трубкой в

прямом направлении, а к прохождению тока в обратном направлении. Этот предел будет полностью совпадать с тем, который имеется в обычных ртутных

Амплитуда обратного напряжения V

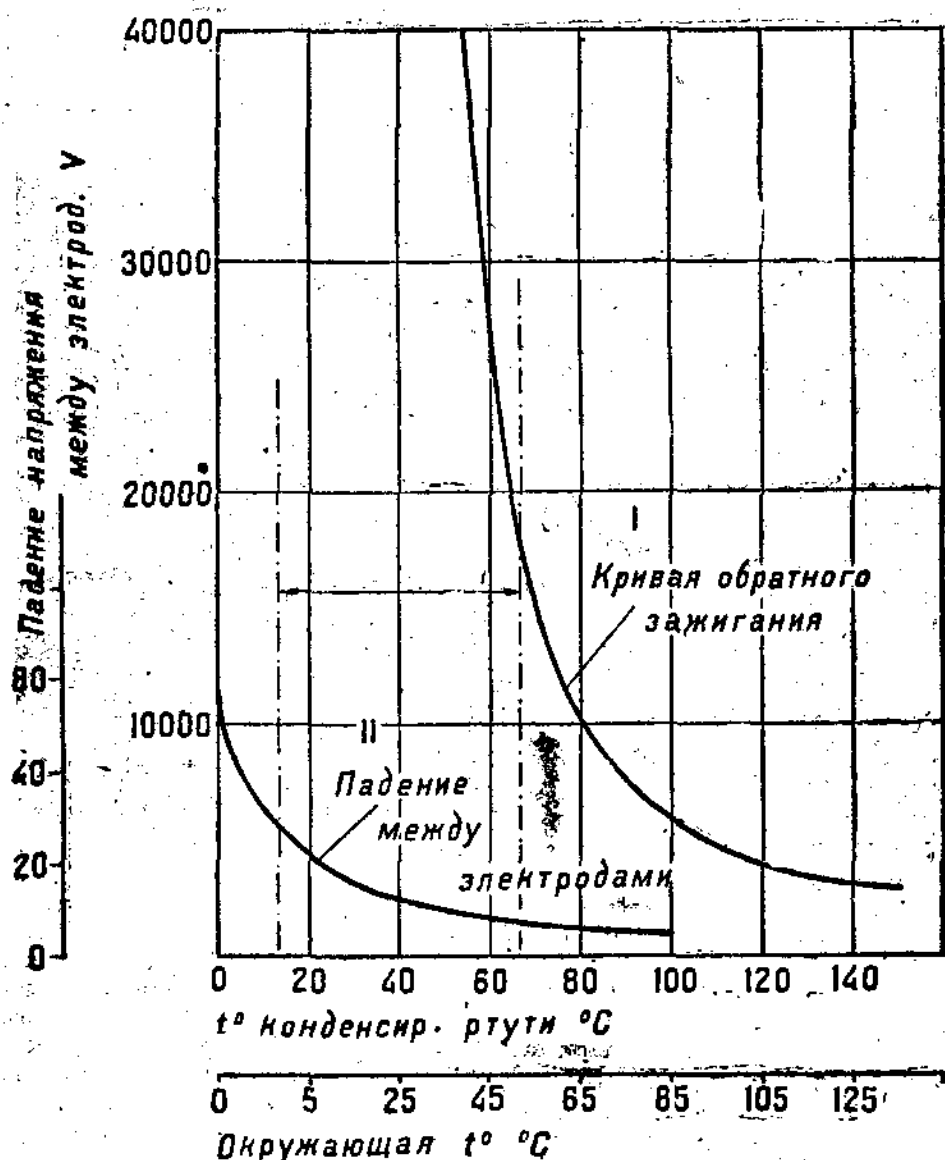


Рис. 110. Зависимость падения напряжения (кривая I) и напряжения обратного зажигания (кривая II) от температуры для выпрямителей типа Rectron.

выпрямителях с жидким катодом для избежания обратного зажигания. Если мы обратимся к рис. 82, дающему зависимость давления паров ртути от

температуры при парах, насыщающих пространство, то увидим, что при температуре 15° давление будет всего лишь около 0,6 микрон Hg, а при 60° составляет уже около 25 микрон Hg, т. е. весьма быстро растет с температурой, согласно ур-нию (55-а).

С другой стороны опыт показывает, что падение напряжения в трубке с изменением температуры конденсирующейся ртути изменяется по кривой II рис. 110, и что кривая обратного зажигания, дающая зависимость напряжения обратного зажигания от температуры, представляется в виде кривой I того же рисунка. Из этих кривых видно, что:

1) для избежания распыления катода необходимо, согласно кривой I, иметь температуру конденсирующейся ртути не ниже 15° , так как иначе давление паров упадет столь низко, что пространственные заряды не будут компенсироваться положительными ионами, и падение в трубке презойдет критическую величину в 22 вольта;

2) температура ртути не должна превосходить 65° , если обратное

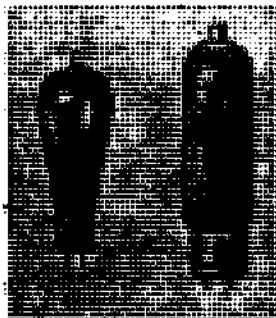


Рис. 111. Внешний вид выпрямителей Rectron типов UV-869 и UV-857.

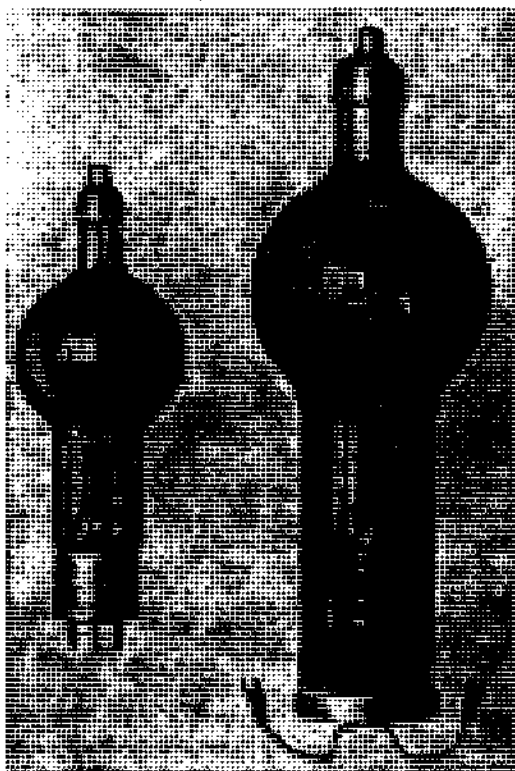


Рис. 112. Внешний вид выпрямителей Rectron типов UX-866 и UV-872.

напряжение будет порядка 10 000 вольт, и, кроме того, желательно иметь двойной запас в смысле отсутствия обратного зажигания.

Если первое условие должно иметь место для всех трубок, на какие бы вольтажки обратного напряжения они ни были рассчитаны, то второе требование может несколько изменяться, в зависимости от величины обратного напряжения.

4. Выпрямитель GEC Rectron.

Рис. 111 относится к выпрямителю фирмы Gen. El. Company, New-York, U. S. A. под названием Rectron или Radatron типа UV-869 и UV-857.

Рис. 112 относится к Rectron'ам типов UX-866 и UV-872. Указанная на кривых I и II рис. 110 температура ртути определяет давление паров ртути в

колбе, причем эта ртуть может находиться в любой части трубки, соединенной с полостью, где помещен катод, достаточно широкими каналами, чтобы динамическое падение давления при малых температурах не играло решающей роли. В конструкциях Rectron'a GEC она находится внизу баллона, в виде нескольких капель, общим весом порядка 1 грамма. Свобода в выборе места помещения ртути обусловлена тем, что светлое катодное пятно находится не на ртути, а на оксидном накалином катоде.

Возможность удаления ртути от катода как раз и дает главные преимущества Rectron'a перед выпрямителем с жидким ртутным катодом, так как здесь возможно осуществление конструкции, при которой температура в области катода может быть во много раз выше, чем та температура, которая соответствует по кривой рис. 110 давлению, необходимому для избежания обратного зажигания.

5. Особенности работы выпрямителей с парами, не насыщающими пространство.

В выпрямителе с оксидным катодом и парами ртути анод и катод могут работать в атмосфере паров ртути, не насыщающих пространство, тогда как при жидком катоде мы связаны именно тем, что вблизи катода пары насыщают пространство. Возможность работы при атмосфере, не насыщающей пространство, имеет преимущества в отношении конструкции и размеров прибора. Повышение температуры, при которой вентиль может работать при данном напряжении без обратного зажигания, нетрудно видеть по кривым, представляющим давление паров, насыщающих пространство, и паров, не насыщающих пространства. Если в первом случае уже при 60° мы имеем давление, при котором, согласно рис. 110, при напряжении 10 000 вольт будет иметь место обратное зажигание, то во втором случае даже при 100° это давление будет столь мало, что обратного зажигания не будет.

Кроме того надо вспомнить, что как для обратного тока, так и для обратного зажигания главную роль играет не давление, а плотность паров, которая с увеличением паров падает.

Сказанное выше позволяет уменьшить размеры колбы, или, вернее сказать, увеличить тепловую нагрузку единицы поверхности колбы, заставляя с каждого см² излучаться большее число ватт потерь в виде тепла, причем однако эта теплоотдача может осуществляться не путем увеличения охлаждения уменьшением теплового сопротивления (см. гл. II, 25, ч. III, таблицу 33), а путем увеличения температуры колбы, что невозможно для ртутных колб с жидким катодом. Благодаря последнему обстоятельству Rectron'ы рассчитываются на естественное охлаждение, без вентилиции. Лишь при весьма высоких окружающих температурах необходимо охлаждение колб вентилятором.

Другое значительное преимущество, вытекающее из наличия не насыщающих паров вблизи катода, состоит в возможности помещения анода в непосредственной близости от катода, в том же резервуаре, не боясь обратного зажигания, что вытекало из пояснений, связанных с рис. 83, данных ранее.

Помещение анода вблизи катода упрощает конструкцию, позволяя широко применять машинную работу заварки вместо ручной, что весьма существенно как с точки зрения стоимости, так и расширения производства.

В ртутных выпрямителях с жидким катодом аноды также работают при высоких напряжениях в атмосфере паров, не насыщающих пространства, но это достигается путем удаления их от катода в длинные трубки, создающие

динамическое падение давления. Кроме неудобств фабрикации длинные трубки создают неудобства, связанные с влиянием стенок, в смысле высокого зажига-тельного потенциала, как это было описано в гл. II, 30, ч. III, чего нет в Rectron'ах. Это обстоятельство очень важно в связи с работой на конденсатор.

6. Падение напряжения в выпрямителях Rectron.

Падение напряжения в выпрямителе типа Rectron весьма мало зависит при нормальном накале от нагрузки. На рис. 113 на кривой / показано это паде-ние в зависимости от тока, для нормального накала, потребляющего 100 ватт для типа Rectron'a UV — 869. Как видно из рисунка, па-дение с нагрузкой уменьшается. При мень-шем накале, отвечаю-щем 80 ваттам, увели-чение падения заметно уже при двойном токе. При малом накале, около 40 ватт, это падение весьма резко поднимается, и прибор конечно не может ра-ботать сколько-нибудь продолжительно. Падение напряжения, пока-завшееся на кривых, при изменении тока ме-няется скачками в пре-делах одного — двух вольт в ту и другую сто-рону, что объясняется образованием на катоде новых кратеров, источ-ников электронов. При недокале падение это весьма велико, но еще более значительно уве-личение падения между электродами в виду быстрого уменьшения активности образовав-шегося кратера, вследствие бомбардировки его ионами, при больших воль-товых скоростях, превосходящих критические величины.

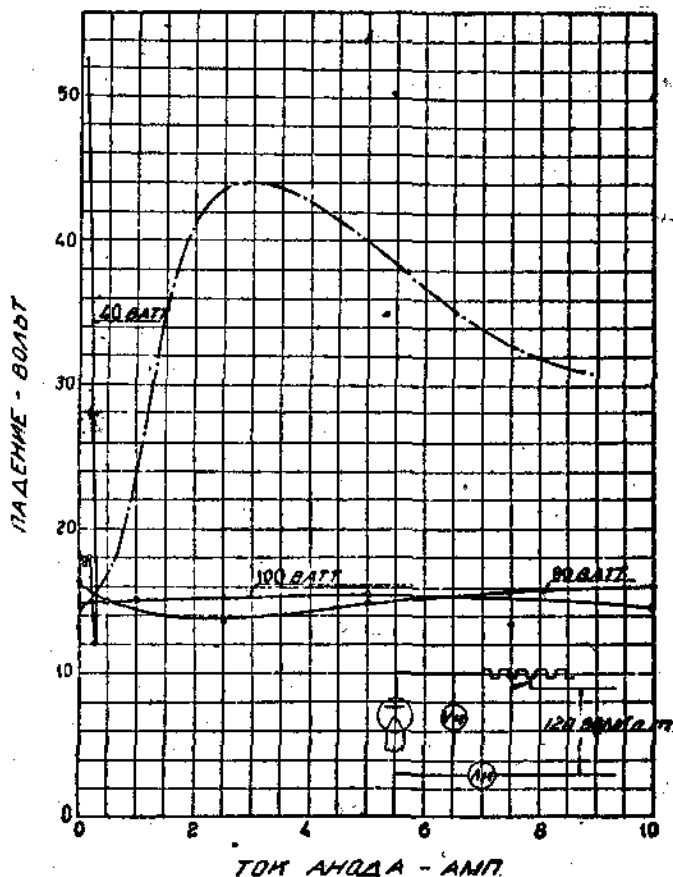


Рис. 113. Падение напряжения в зависимости от тока анода при различных накалах для выпрямителя Rectron типа UV — 869.

7. Устройство катода.

Катод этого выпрямителя состоит из гофрированной полосы, свернутой в спираль и накаляемой током. Эта спираль покрыта оксидом. Такого рода

устройство катода выгодно тем, что допускает получение весьма высокой эмиссии, чем обеспечивается малое падение в трубке при весьма больших токах. Что касается распыления оксида бомбардировкой положительными ионами, то помимо соображений, приведенных выше и относящихся к ограничению скоростей ионов величинами ниже 22 вольт, самое устройство катода, при котором активная часть его лежит глубоко между витками спиралей и мало доступна ударам тяжелых ионов, бомбардирующих преимущественно ребра спирали, — предохраняет катод от распыления. С другой стороны, как показывал опыт, электроны могут свободно вылетать из углублений между витками, почему вся весьма значительная поверхность спирали в смысле эмиссии хорошо используется.¹

8. Сравнительные данные оксидных ртутных выпрямителей и кенотронов и данные Rectron'ов.

В таблице 37 приведено сравнение Rectron'ов различных типов с кенотронами в смысле отдачи и падения, а в таблице 38 даны основные данные для Rectron'ов (Radiotron'ов).

Таблица 37.

Число катода	Схема выпрямления	Тип	Система	Ток, амп.	Выпрямленные			Падение в колбе, вольт	Потери		Отдача, %
					вольты	амп.	квт.		на накал, квт	на падение, квт	
6	3 дв. звезды	UV — 214	Кенотрон	6	15 000	12	180	1 560	6,9	18,7	87,5
6	3-х фазное выпр. обеих половин (схема Грэтца (Grätz))	UV — 857	Ртутн. выпр. с накатодом	12	15 000	12	180	15	1,8	0,36	98,8
6 ²		UV — 857		20	19 100	20	382	15	1,8	0,6	99,4

Таблица 38.

Тип Rectron'a	Накал		Амплитуда обратного напряжения, вольт	Амплитуда анодного тока, ампер	Размеры	
	вольт	ампер			Наиб. длина, мм	Наиб. диаметр, мм
UX — 866	2,5	5	5 000	0,6	143	139
UV — 872	5	10	5 000	2,5	216	59
UV — 869	5	20	20 000	5,0	—	—
UV — 857	5	60	20 000	20,0	—	—

¹ Конструкция катодов, имеющих такую форму, при которой одна часть поверхности служит для испускания электронов, а другая для принятия ударов ионов и защиты первой части от распыления, предложена также М. М. Ситниковым. (Заяв. св. № 14712 от 16 апр. 1927 г.).

² Максимальная нагрузка.

9. Падение в Rectron'e и схема включения.

При столь малом падении в колбе, как 15 вольт, выпрямительное устройство с Rectron'ами дает значительно меньшее падение напряжения сравнительно с кенотронным. Так, при кенотронном устройстве мы имеем, в виду большого падения между электродами, достигающего, как это видно из таблицы 33, 1560 вольт, общее падение устройства порядка $17 - 20\%$, тогда как устройство с ртутными выпрямителями дает падение всего лишь в 8% , что играет существенную роль.

Однако малое падение в колбе вызывает ряд неудобств; так, в устройстве с кенотронами ток насыщения ограничивает перетоки при включении, уменьшая вместе с тем и перенапряжение при включении и изменении режима. Здесь же мы имеем все неудобства, связанные с малым падением. В виду этого включение мощных выпрямителей с ртутными парами должно производиться с соблюдением условий, указанных в гл. I, 8, 10, 11, ч. IV и касающихся перенапряжений и перетоков.

Помимо соображений, высказанных в этой главе, необходимо сказать, что перетоки могут вызвать здесь увеличение падения, а, значит, более быстрое разрушение катода.

Из рис. 110 видно, что нормальная работа Rectron'a может иметь место, лишь начиная с температуры ртути в 15° , откуда видно, что при понижении температуры помещения ниже 15° анодное напряжение и нагрузка могут быть даны лишь после нагревания ртути выше этой температуры, в противном случае мы будем иметь большое падение в колбе и распыление катода. Так же точно, из соображений правильного и постепенного нагревания катода, необходимо его разогревание в течение около 10 и даже 30 минут, прежде чем выпрямителю дать нагрузку. Это обстоятельство является большим минусом для устройства.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

РАБОТА СТЕКЛЯННОГО РТУТНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ.

1. Конструкция стеклянных ртутных выпрямительных устройств.

Ртутные колбы, в виду их малой механической прочности, обычно помещаются в металлических шкафах, защищающих, кроме того, подводящие провода и части управляющих устройств от случайных прикосновений; это тем более необходимо, что за исключением весьма малых выпрямителей на низкие напряжения, в выпрямительных устройствах имеют место напряжения, отнесенные, в смысле их опасности для жизни, к высоким. Самые колбы, или при больших установках — целый ряд колб, подвешиваются в шкафу таким образом, чтобы можно было осуществить их качание, связанное с пуском в ход. Устройство для подвешивания колбы, применяемое ВЭО, показано на рис. 114.

В непосредственной близости от колбы обычно располагается трансформатор возбуждения, реактивные катушки, как анодные, так и катодные, вентилятор, служащий для охлаждения, выключающее и предохранительное устройство. На рис. 115 представлено расположение всех этих частей, отвечающих выпрямительному устройству, изготовляемому трестом „Электросвязь“ ВЭО.

Большая или меньшая сложность устройства зависит от тех требований, какие предъявляются к установке, а также зависит и от мощности установки. При тяжелых колбах, на несколько сот ампер, вся система, на которой

крепится колба, выдвигается вместе с колбой наружу, что облегчает смену последних; такого рода устройство показано на рис. 116. Вентилятор выпрямляющих устройств часто снабжается выключателем, который, действуя от реле, пускает его в ход лишь тогда, когда сила тока выпрямителя превосходит

некоторую определенную величину; благодаря этому выпрямительная колба работает при режиме, отвечающем наименьшему падению внутри колбы.



Рис. 114. Общий вид устройства для подвеса колбы, системы ВЭО.

устройство содержит в себе элементы постоянного и переменного тока, то оно допускает регулировку постоянного напряжения и тока помощью реактивных сопротивлений, т. е. регулировку в главном токе без потерь энергии, правда, с ухудшением коэффициента мощности.

3. Выпрямители с автоматическим управлением.

Последнее время получили большое распространение стеклянные ртутные выпрямители с автоматическим управлением. Преимущество их состоит в том, что в этом случае все устройство может быть установлено в доступном для постоянного ухода помещении или в значительном расстоянии от места управления; на рис. 118 приведена схема такого рода автоматического устройства для подстанции электрической дороги, применяемая фирмой Броун-Бовери. Обслуживание такого устройства может производиться специальными часами, которые устанавливаются для включения и выключения в определенное время; выключатель, работающий от этих часов, прежде всего включает масляные

2. Регулировка напряжения.

В случае необходимости регулирования напряжения выпрямитель снабжается или реактивными катушками в анодах или реактивными катушками в первичной обмотке на трансформаторе, или наконец ступенчатым трансформатором. На рис. 117 показан ряд наиболее употребительных схем, служащих для регулирования напряжения.

Без устройств для регулирования напряжения могут быть построены только малые выпрямительные устройства.

Выпрямительные устройства для обслуживания освещения всегда должны быть снабжены регулирующим приспособлением, так же точно как и выпрямительное устройство для зарядки аккумуляторов нуждается в регулирующих устройствах. Так как выпрямительное

выключатели трансформаторов, в результате чего выпрямительное устройство получает напряжение, и колбы пускаются в ход обычным автоматическим зажигающим приспособлением. После того как колбы зажглись, приходит в действие включающий аппарат, который через несколько секунд дает постоянный

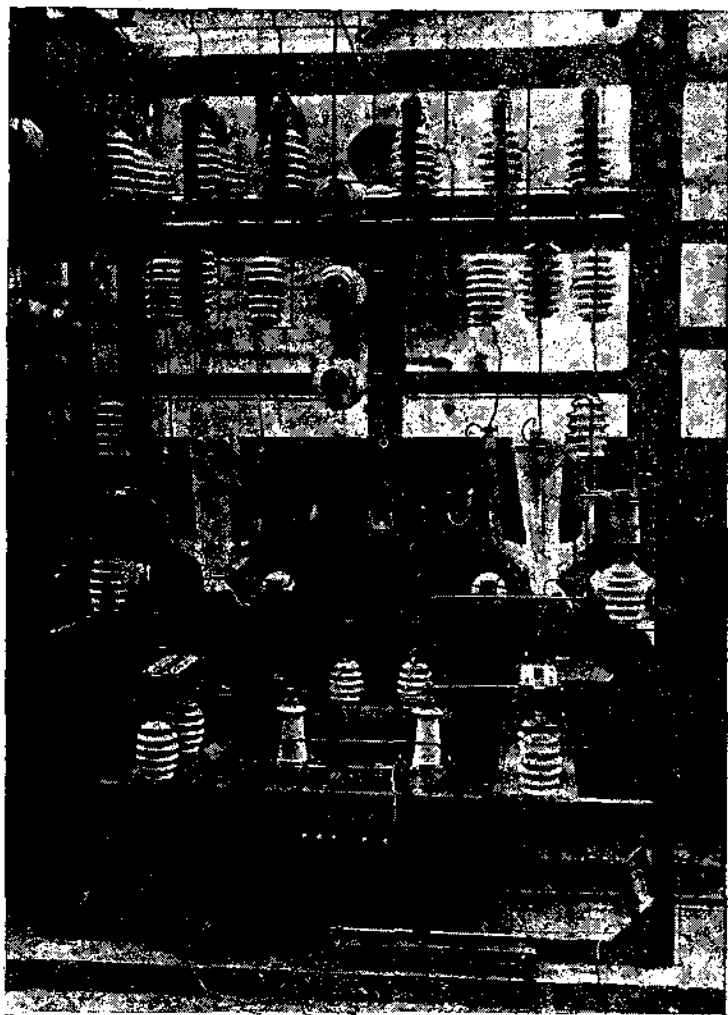


Рис. 115. Общий вид (сзади) выпрямительного устройства системы ВЭО с стеклянными ртутными выпрямителями.

выпрямленный ток на ту или другую линию, после чего данная подстанция готова для работы.

Если временно увеличивается расход тока в такой мере, что одно выпрямительное устройство будет перегружено, то приходит в действие максимальное реле, которое включает при посредстве реле времени масляный выключатель второго выпрямителя. Колбы этой группы зажигаются так же, как и в первом случае; если обратно нагрузка данной подстанции будет на продол-



Рис. 116. Выдвижная установка стеклянного ртутного выпрямителя.

жительное время ниже некоторой определенной величины, то приходит в действие минимальное реле, которое воздействует при посредстве реле времени на масляный выключатель второй группы выпрямителя, выключая ее, после чего подача тока производится одной лишь первой выпрямительной группой.

При наступлении времени, когда выпрямительное устройство должно быть остановлено, упомянутые выше управляющие часы замыкают второй контакт, вследствие чего выключается масляный выключатель первой выпрямительной группы. Одновременно с этим автоматически выключается выпрямленный ток всех линий.

Специальный выключатель позволяет включать первой по выбору то ту, то другую выпрямительную группу.

Такого рода устройство может работать без всякого ухода; в виду этого оно должно быть снабжено рядом устройств, служащих для предохранения от могущих иметь место нарушений правильной работы. К та-

ким случаям надо отнести короткое замыкание в линии. Такие замыкания нередки в случае обслуживания выпрямительным устройством трамзав. При

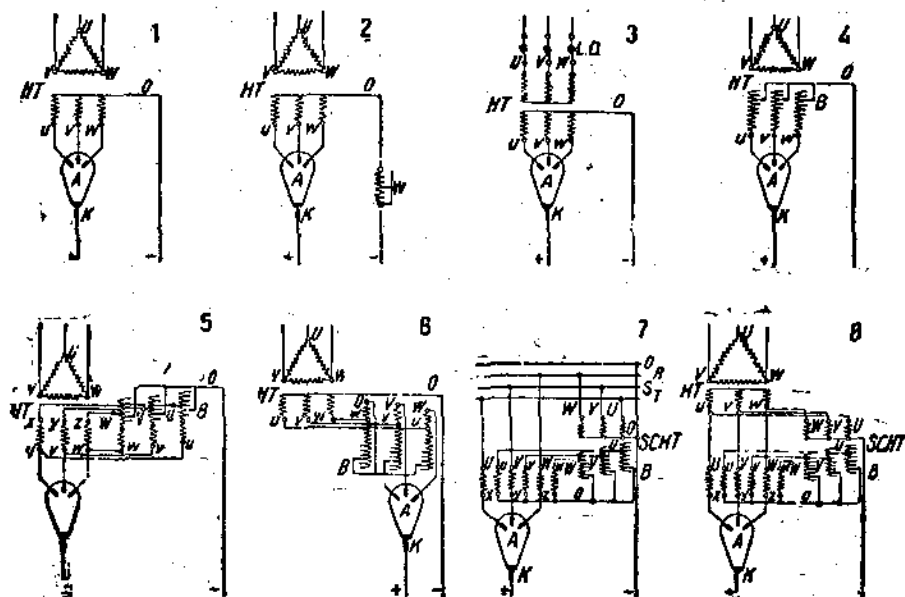


Рис. 117. Схемы регулировки напряжения ртутных стеклянных выпрямителей.

коротких замыканиях выключается та часть линии, в которой это замыкание произошло, причем в дальнейшем подача тока другим линиям должна продолжаться без перерыва. Что касается поврежденной линии, то и на нее в случае прекращения короткого замыкания ток должен подаваться без замедления. Это достигается помощью специального выключающего аппарата, который немедленно после выключения поврежденной линии приходит в действие и начинает через каждые 16 секунд вновь включать эту линию; это включение производится три раза подряд. Если после одного из этих включений выключатель останется включенным, то короткое замыкание надо считать исчерпанным и работа устройства продолжится нормальным порядком. Если после трех повторных включений выключатель, отвечающий поврежденной линии, будет выключен максимальным реле, то повторное включение этой линии прекращается. В этом случае, как и в других случаях, которые будут указаны ниже, загорается красная сигнальная лампа, установленная вне выпрямительного устройства. Кроме этой лампы загорается еще другая лампа, помещенная снаружи здания, а запираемой ящике. Ключ от этого ящика имеется у вагонновожатых, которые могут после устранения причины повреждения открыть этот ящик и посредством специального выключателя, помещенного в этом ящике, вновь включить поврежденную линию. Как только это будет произведено, обе сигнальные лампы потухнут.

Если по каким-нибудь причинам одна из колб выпрямителя не сможет работать, то опять-таки загорается красная лампа вне помещения выпрямителя и в упомянутом выше ящике загорается другая лампа, которая показывает вагонновожатому род повреждения. Вагонновожатый, пользуясь телефоном, помещенным в том же ящике, сообщает надлежащему персоналу о случившемся повреждении колбы.

Чтобы избежать длительных вредных перегрузок выпрямительного устройства, каждая колба снабжена термическим максимальным реле, которое выключает ту или другую выпрямительную группу. Масляный выключатель имеет кроме того независимое максимальное реле, могущее выключить каждую из групп при значительных повреждениях, например при повреждениях трансформатора. На случай повреждения вентилятора в воздушной струе помещено крыло, которое после прекращения воздушной струи падает, замыкая этим контакт реле масляного выключателя; в этом случае, как и ранее, загорятся сигнальные лампы.

4. Полуавтоматы для зарядки аккумуляторов.

Кроме такого рода полных автоматических подстанций некоторыми фирмами, например фирмой ВВС, изготавливаются полуавтоматические устройства, служащие для зарядки аккумуляторов. Здесь после включения выпрямительного устройства на зарядку необходимое поднятие напряжения происходит за счет уменьшения тока, помощью реактивной катушки в анодах или в первичной цепи трансформатора.

Далее по повышению напряжения батареи до определенной величины приходит в действие реле, которое пускает в ход часовой механизм, выключающий батарею и все устройство через определенное время, на которое может быть заранее установлен часовой механизм. Это время необходимо для перезарядки батареи.

Б. Коэффициент полезного действия стеклянного ртутного выпрямителя.

Коэффициент полезного действия стеклянного ртутного выпрямителя в значительной степени отличается от к. п. д. других машин, служащих для преобразования переменного тока в постоянный, не только с точки зрения величины, но и хода кривой к. п. д. в зависимости от напряжений и нагрузки. Это обстоятельство вытекает из того, что падение в колбе практически не зависит от выпрямленного напряжения или вернее от типа колбы и составляет от 18 до 20 вольт для низковольтной колбы, почему переменные потери будут линейно зависеть от нагрузки:

$$W = Ie',$$

тогда как в машинных преобразователях переменные потери зависят от квадрата тока нагрузки:

$$W = I^2 R.$$

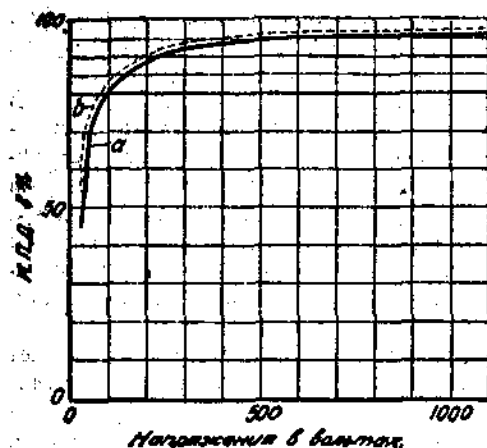


Рис. 119. Зависимость к. п. д. стеклянного ртутного выпрямителя от величины выпрямленного напряжения.

Как видно из кривых рис. 31, к. п. д. сохраняет почти постоянную величину до нагрузки в $\frac{1}{4}$ от нормальной, тогда как для машинных преобразователей он быстро падает.

Отсюда следует, что особенно выгодно применение ртутного выпрямителя для установок с переменной нагрузкой. Приведенные кривые относятся к отдаче колбы, не учитывая потерь в трансформаторе для всех преобразователей. Последние для выпрямителя несколько более велики, приблизительно на $\frac{1}{2}\%$.

Вследствие, ранее уже указанного, постоянства падения в колбе, к. п. д. весьма сильно зависит от величины выпрямленного напряжения. На кривой рис. 119 даны зависимости полного к. п. д. от величины выпрямленного напряжения.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

РАБОТА ВЫПРЯМИТЕЛЯ ПРИ РАЗНЫХ ХАРАКТЕРАХ НАГРУЗКИ.

1. Элементарная схема с одним вентилем. Разные случаи нагрузки.

Можно думать, как это в действительности часто и имеет место, что роль выпрямителя сводится лишь к тому, чтобы, пропуская ток в одном направлении, в частности при переменном токе, пропуская один полупериод, задерживать прохождение тока другого направления, т. е. другой полупериод. При этом, в остальном, возможно при определении значений токов и напряжений руководствоваться обычными соотношениями, принятыми в технике сильных токов.

В действительности же дело обстоит здесь несколько иначе; если для чисто безындукционной нагрузки устройства возможно считать, что роль вентиля сводится к задерживанию одного полупериода, то во всех других случаях явления протекают более сложно, в силу того, что за каждый полупериод мы имеем картину, усложненную явлениями неустановившегося режима, которые и должны быть учтены. В виду сказанного мы и рассмотрим ряд отдельных случаев работы вентиля, различающихся по характеру нагрузки, подробно осветив наиболее часто встречающиеся в практике.

Случаи эти следующие:

- 1) вентиль нагружен чисто ваттным сопротивлением;
- 2) в качестве нагрузки взята реактивная катушка с индуктивностью L , т. е. нагрузка чисто безаваттная;
- 3) в цепи нагрузки имеется ваттное сопротивление R и индуктивность L ;
- 4) вентиль работает на безындукционное сопротивление R , параллельно которому включен конденсатор емкостью C и последовательно с вентилем индуктивность L ;
- б) в цепи нагрузки имеется сложный фильтр.

2. Случай 1-й. Цепь нагрузки имеет лишь ваттное сопротивление R .

В этом случае, при одном вентиле, включенном по схеме рис. 120, при наличии э. д. с. e_w для силы тока получим кривую i , мгновенные значения которой будут в пределах одного полупериода равны:

$$i = \frac{e_w}{R}. \quad (82)$$

Более сложные схемы для этого случая, а также эффективные и средние значения токов и напряжений будут рассмотрены в гл. I и II, ч. V.

Для того, чтобы перейти здесь к более сложным, многофазным схемам, достаточно взять несколько элементарных одновентильных схем, показанных

на рис. 120 и соединить их, образуя многофазную систему. Различные схемы включения описаны в гл. II, ч. IV и в гл. I и II, ч. V.

Что касается напряжений при этих соединениях и токов, то при этом нужно исходить из следующих положений, относящихся лишь к случаю 1. Напряжение,

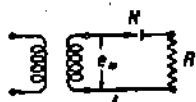
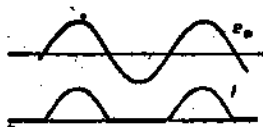


Рис. 120. Кривые э. д. с. и тока и схема с одним вентилем, работающим на безындукционное сопротивление (случ. 1-й).

даваемое многофазным устройством, состоящим из нескольких простых устройств с одним вентилем, будет в каждый момент времени равно мгновенному напряжению того из элементарных устройств, величина которого будет наибольшей. Таким образом здесь мгновенное напряжение отдельных фаз не складывается ни алгебраически, ни геометрически. Так, при двухфазном соединении простых схем получим схему рис. 121 и э. д. с., которую дает все устройство, состоящее из трансформатора и вентиля, в виде кривой i_R , представляющей сумму кривых i_1 и i_2 .

Для 3-фазного соединения элементарных схем необходимо сдвинуть э. д. с. их не на 180° , как при двух фазах, а на 120° , согласно рис. 122.

Для той э. д. с., которую может быть заменена вся система, включающая трансформатор и вентили, может быть принята, согласно написанному выше положению, лишь кривая e'_w , прочерченная на рис. 122 толстой линией.

Для общего выпрямленного тока устройства можем теперь из соотношения $i_R = \frac{e'_w}{R_1}$

как и для элементарного, одновентильного устройства, получить ток i_R , показанный

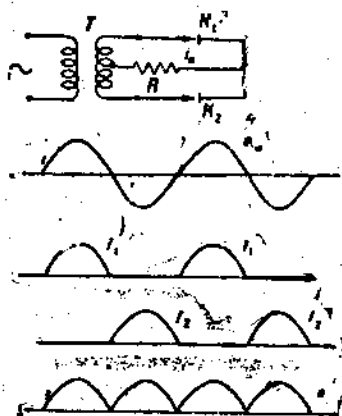


Рис. 121. Кривые э. д. с. и токов и схема с двумя вентилями, работающими на безындукционное сопротивление.

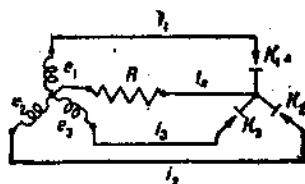


Рис. 122. Кривые э. д. с. и токов и схема с тремя вентилями, работающими на безындукционное сопротивление.

на рис. 122. Этот ток, как видно, складывается из токов отдельных вентилях i_1 , i_2 и i_3 , показанных на тех же рисунках.

Из сказанного выше видно, что при всех дальнейших рассмотренных, после

маны э. д. с. устройства э. д. с. e'_w согласно рис. 122, можно при всех вычислениях уже не считаться с вентилем. Необходимо оговориться, что здесь мы полагаем падение в вентиле $= 0$ и нагрузку чисто ваттной в виде сопротивления R .

3. Случай 2-й. Элементарный вентиль работает лишь на реактивную катушку с индуктивностью L . Многофазная схема для этого случая.

В этом случае для тока получится выражение

$$i_L = \frac{E_m}{\omega L} (1 - \cos \omega t), \quad (83)$$

которое выведено Н. Д. Папалекси (см. App. d. Physik, 1912, 976). Графически кривая силы тока согласно ур-нию (83) показана на рис. 123 пунктирной линией, если e_w — напряжение трансформатора и i_R — тот ток, который шел бы в случае нагрузки лишь на ваттное сопротивление R .

Из ур-ния (83) и рис. 123 видно, что выпрямленный ток даже при одном вентиле идет *весь период* и что роль вентиля сказывается лишь одно мгновение.

При этом можно было бы думать, что вентилем, могущим вынести весьма малую обратную э. д. с., можно выпрямлять большие напряжения. Хотя это конечно и так, но оно не имеет большого практического значения, ибо при таком выпрямлении, выпрямленный ток будет согласно ур-нию (83) тем меньше, чем больше ωL . Для того же, чтобы получить картину, отвечающую рис. 123, необходимо, чтобы ωL было бесконечно велико по отношению к R , следовательно выпрямленный ток будет весьма мал. Это выражение (ур-ние 83) для тока весьма интересно тем, что только в этом случае возможно менять силу выпрямленного тока, пользуясь лишь одной реактивной катушкой.



Рис. 123. Кривые э. д. с. и токов при работе вентиля на чисто реактивную нагрузку (случай 2-й).

Если для этого случая перейти к многофазным системам, то здесь мы получим совершенно другую картину, чем в случае 1-ом. Там выражение для выпрямленного тока (ур-ние 82) ничем не отличается от выражения для того же тока элементарного выпрямителя. Здесь же величину силы тока всего многофазного устройства мы получим, исходя из э. д. с. всего устройства согласно положению, высказанному в случае 1-ом для многофазных систем, т. е. исходя из э. д. с. согласно толсто прочерченной кривой e'_w рис. 122, и из сопротивления ωL . Совершенно очевидно, что так как на кривой напряжения e'_w мы имеем некоторую постоянную составляющую V_k и переменную, дающую пульсации, то сопротивление ωL будет играть роль лишь в смысле уменьшения переменной составляющей (при больших величинах ωL уменьшая ее до бесконечно малых величин), но не будет сказываться на постоянной составляющей, и здесь вместо малого тока мы получим весьма большой выпрямленный ток, без заметных пульсаций.

4. Случай 3-й. В цепи элементарного выпрямителя включены последовательно индуктивность L и ваттное сопротивление R .

Не выводя этого выражения подробно, получаем здесь для силы тока следующую формулу:

$$i = \frac{E_m \cos \varphi}{R} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi \cdot e^{-\frac{\omega t}{\lg \varphi}} \right], \quad (84)$$

где $\lg \varphi = \frac{\omega L}{R}$.

Кривая тока для этого случая мало отличается от кривой рис. 123, если $\frac{\omega L}{R}$ значительная величина.

При переходе в этом случае к многофазной системе, мы получим для определения тока, так же как и в случае 2-ом, в качестве э. д. с. кривую e'_w рис. 122 и в качестве сопротивления результирующее сопротивление:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (85)$$

Так как этот случай при многофазных системах представляет наибольший интерес, то он будет подробно разобран в гл. I, ч. V.

5. Случай 4-й. Вентиль работает на сопротивление R и емкость C , включенную параллельно этому сопротивлению, последовательно с вентилем включена индуктивность L .

Схема, отвечающая этому случаю, показана на рис. 124, где K — вентиль и r — сопротивление, отвечающее сопротивлению трансформатора и вентиля и вообще всей цепи. Не трудно видеть, что

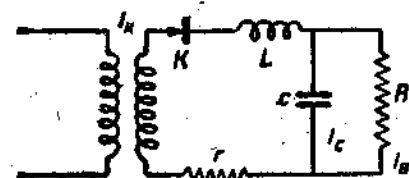


Рис. 124. Принципиальная схема случая 4-го работы вентилей.

здесь, как и в случае 2-ом, мы будем иметь неустановившийся режим, имеющий место за каждый период подводимого тока, почему и напишем для тока, проходящего через вентиль:

$$i_k = i_s + i_v, \quad (86)$$

и для напряжения на конденсаторе:

$$e_c = e_s + e_v, \quad (87)$$

где величины со значком s отвечают стационарным, а со значком v токам и напряжениям свободных колебаний.

Для э. д. с. трансформатора примем:

$$e_w = E_m \sin \omega t. \quad (88)$$

Роль вентилей в схеме рис. 124 сводится к выключателю, который включает цепь тогда, когда ток i_k может иметь положительное значение, причем включает его в том случае, когда этот ток приобретает значение равное нулю или некоторое положительное значение.

Для стационарных величин напишем:

$$i_s = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi), \quad (89)$$

причем:

$$Z = \sqrt{\left(r + \frac{A}{A^2 + \omega^2 C^2}\right)^2 + \left(\omega L - \frac{\omega C}{A^2 + \omega^2 C^2}\right)^2}, \quad (90)$$

где $A = \frac{1}{R}$.

Так же точно и для напряжения:

$$e_s = \frac{E_m Z_1}{Z} \sin(\omega t - \varphi - \psi), \quad (91)$$

где

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega C}{A}, \quad (92)$$

и

$$Z_1 = \frac{1}{\sqrt{A^2 + \omega^2 C^2}} \quad (93)$$

Если вместо вентиля был бы выключатель K и он был замкнут длительно, то спустя некоторое время через него установился бы ток, согласно ур-нию (89), и на конденсаторе напряжение отвечало бы ур-нию (91).

Изменение той и другой величины показано на рис. 125.

Для определения величин, отвечающих свободным колебаниям, можем написать, исходя из рис. 124:

$$i_v + L \frac{di_v}{dt} + \frac{1}{C} \int i_c dt = 0, \quad (94)$$

где

$$\frac{1}{C} \int i_c dt = i_R \quad (95)$$

и

$$i_v = i_c + i_R. \quad (96)$$

Из ур-ний (95) и (96) определим i_v и i_R и подставим в ур-ние (94), откуда и получим уравнение, которое даст значение тока свободных колебаний:

$$\frac{d^2 i_v}{dt^2} + 2\delta \frac{di_v}{dt} + N i_v = 0, \quad (97)$$

где

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{CR} + \frac{r}{L} \right) \quad (98)$$

и

$$N = \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right). \quad (99)$$

Решение ур-ния (97) даст для i_v :

$$i_v = e^{-\delta t} (\alpha \sin \sigma t + \beta \cos \sigma t), \quad (100)$$

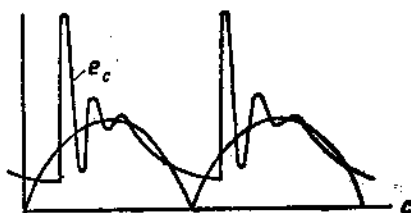
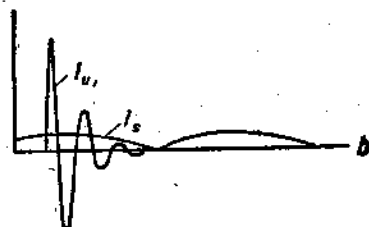
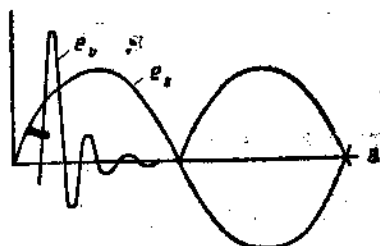


Рис. 125. Токи и напряжения стационарные i_s , e_s и свободных колебаний i_v , e_v для случая 4-го работы вентиля.

где

$$\sigma = \sqrt{N - \delta^2} \quad (101)$$

есть круговая частота собственных колебаний системы, показанной на рис. 124, и δ — фактор затухания той же системы, α и β — постоянные интегрирования. Величины δ и σ определяют логарифмический декремент системы:

$$\delta = \frac{2\pi\delta}{\sigma} \quad (102)$$

Для напряжения на конденсаторе аналогичным путем найдем выражение:

$$e_c = e^{-\delta t} (k \sin \sigma t + l \cos \sigma t), \quad (103)$$

где k и l — постоянные интегрирования, зависящие от начальных условий.

На рис. 125 показаны кривые тока свободных колебаний и напряжения на конденсаторе для цепи рисунка 124

Не трудно видеть, что в случае

$$\delta^2 < N \quad (104)$$

мы будем иметь в цепи колебания с частотой σ и декрементом δ , показанные на рис. 125, а в случае

$$\delta^2 > N \quad (105)$$

контур будет аperiодическим.

В последнем случае для значения i_0 из ур-ния (97) можем написать:

$$i_0 = e^{-\delta t} (Ae^{-\sigma t} + Be^{-\sigma t}), \quad (106)$$

где A и B — постоянные интегрирования. Зная величины i_0 , e_0 , i_1 и e_1 , подставим их в уравнения (86) и (87) и получим значения действительных токов и напряжений.

Имея ур-ния (86) и (87) для одновентильной элементарной схемы рис. 124, мы можем, задаваясь начальным моментом включения и принимая во внимание пограничные условия, найти постоянные интегрирования, чего мы однако делать для одновентильной схемы не будем, так как здесь картина мало отличается от многофазной схемы, для которой мы и рассмотрим изменения токов и напряжений.

6. Многофазная схема для случая 4-го.

В многофазной схеме рис. 126, через некоторое время после включения конденсатор C зарядится, и изменения напряжений и токов могут быть представлены в виде рис. 127, который отвечает двухфазной схеме.

Для большей общности наших выводов мы предположим, что вентиль имеет зажигающий потенциал, равный e_p ; таким образом его характеристика взята отвечающей рис. 94 и 95. Кривая e_c дает конденсаторное напряжение и кривая e_w — напряжение трансформатора. Ток через вентиль K пойдет лишь тогда, когда $e_w \geq e_c + e_p$, почему для начального момента прохождения тока и можно написать:

$$e_{w0} = e_{c0} + e_p \quad (107)$$

где величины со значком нуль относятся к начальному моменту t_0 прохождения тока через вентиль. Начиная с этого момента, ток пойдет по ур-нию (86), как это начерчено на рис. 127 внизу. Э. д. с. трансформатора опережает начальный

момент тока на угол $\xi = \omega t_0$. В этот момент t_0 клапан K играет роль рубильника, включающего трансформаторную цепь рис. 124.

Нахождение тока i_k по ур-нию (86) и отвечающего ему напряжения e_k может вестись лишь до тех пор, пока или значение тока i_k не делается равным нулю, как это показано на рис. 127, или же до того момента, когда должна вступить в работу следующая фаза или начать действовать, в смысле прохождения, следующий клапан. Это будет тогда, когда напряжение следующей фазы e_2 будет

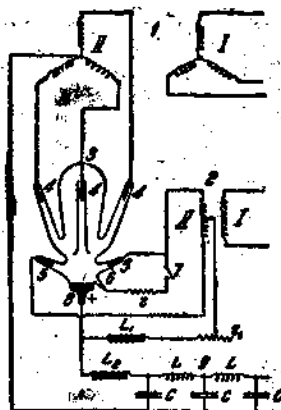


Рис. 126. Многофазная схема случая 4-го работы клапана.

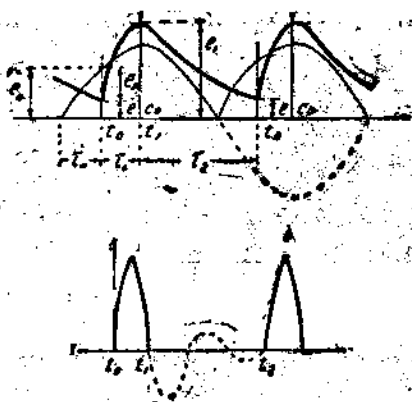


Рис. 127. Токи и напряжения, отвечающие двухфазной схеме случая 4-го работы клапана.

больше на величину зажигающего потенциала e_p напряжения работающей фазы e_1 . Для трехфазного тока это будет от начального момента, при установившейся работе, через $\sim \frac{1}{3}$ периода. Таким образом ур-нием (86) можно пользоваться в пределах от t_0 до t_1 (рис. 127).

Для определения постоянных интегрирования имеем пограничные условия: для момента t_0

$$e_{w0} = E_m \sin \xi, \quad (108)$$

$$e_{w0} = e_p + e_{c0}, \quad (109)$$

и

$$i_{k0} = 0 = i_{s0} + i_{c0}, \quad (110)$$

для момента t_1 :

$$e_1 = e_{s1} + e_{c1}, \quad (111)$$

$$i_{k1} = 0 = i_{s1} + i_{c1}, \quad (112)$$

кроме того для цепи имеем соотношение:

$$i_c = C \frac{de_c}{dt} + A e_s, \quad (113)$$

Перечисленные выше пограничные условия относятся к тому случаю, когда ток имеет вид, показанный на рис. 127, т. е.

$$i_{k1} = 0. \quad (114)$$

Если ток не принимает значения, равного нулю, то пограничные условия должны быть соответственно изменены.

Если в момент $t_1 i_k = 0$, то конденсатор будет разряжаться до момента t'_0 и тогда для напряжения на конденсаторе получим для промежутка времени $t_1 - t'_0$ значения из уравнения:

$$e_c = e_1 e^{-\frac{t-t_1}{CR}} \quad (115)$$



Рис. 128 а



Рис. 128 б.

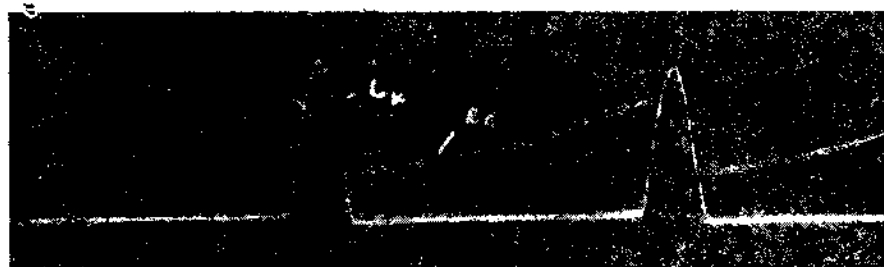


Рис. 128 в.

Если ток и напряжение имеют вид, показанный на рис. 127, то этим и заканчивается полный период изменений тока i_k и напряжения e_c . На осциллограммах рис. 128 приведены кривые, снятые для разных условий работы выпрямительного устройства. (Рис. 128 а $\sigma > k\omega$; рис. 128 б, в, с, д, е, ф, г — $\sigma < k\omega$.)

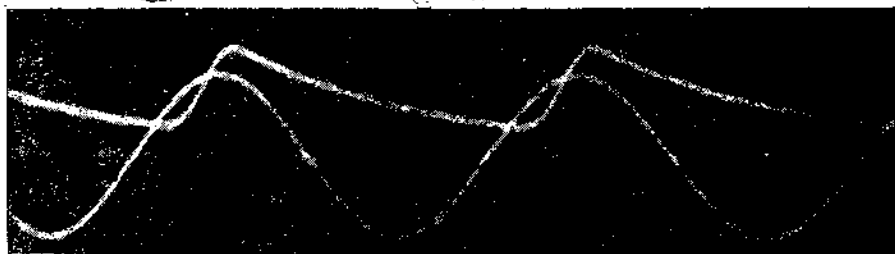


Рис. 128 d.

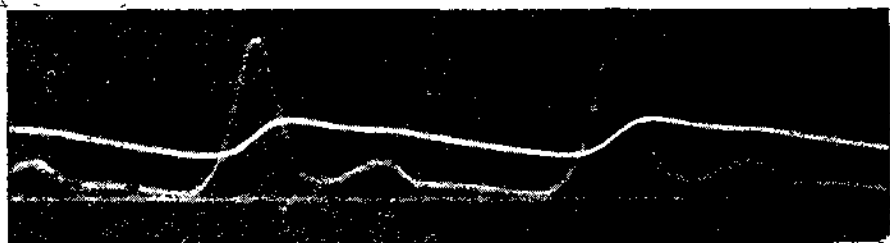


Рис. 128 e.

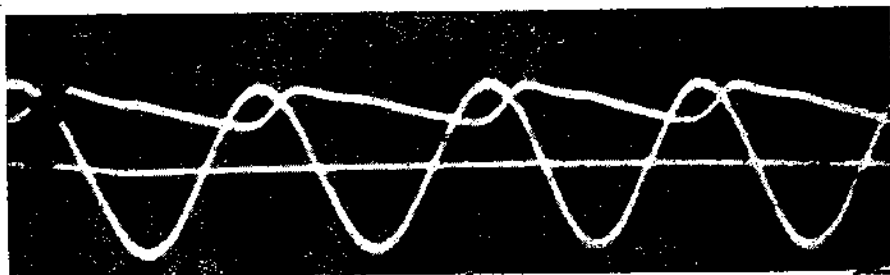


Рис. 128 f.

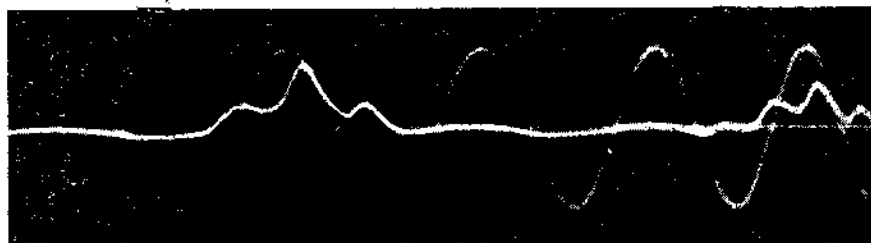


Рис. 128 g.

Рис. 128 а — г. Осциллограммы для разных случаев работы выпрямительного устройства на емкость (случай 4-й).

7. Графическое построение токов и напряжений для случая 4-го.

Значительно однако проще чисто аналитического решения задачи исходить из следующего допущения и графического построения.

Примем, что выпрямительное устройство включается при $e_{w_1} = 0$ и что напряжения других фаз также равны нулю, что может быть в том случае, если ножи рубильника включаются не одновременно.

Имея граничные условия для ур-ний (86) и (97): $i_k = 0$ и $e_{w_1} = 0$, определим постоянные интегрирования, что даст значение i_k .

Далее может быть два случая: или i_k примет значение $i_{k_1} = 0$, или этого не будет до момента времени, при котором

$$e_{w_1} = e_{w_1} + e_p \quad (116)$$

где цифровые значки отвечают номеру фазы.

В первом случае, исходя от значения $e_c = e_1$, отвечающего значению, при котором $i_k = 0$, находим ход кривой e_c , согласно ур-нию (115), до пересечения этой кривой с кривой напряжения второй или вообще следующей фазы e_{w_2} и до момента t_0 , при котором

$$e_c = e_{w_2} - e_p \quad (117)$$

После наступления этого момента определяем новые постоянные интегрирования из найденных графически граничных условий и ведем построение опять по ур-ниям (86) и (87) и т. д. Во втором случае все время ведем построение по ур-ниям (86) и (97), определяя лишь постоянные интегрирования в моменты времени, отвечающие вступлению в работу новой фазы.

На рис. 129а, 129б и 130 сделаны такого рода построения для указанных на рисунках значений емкости C , индуктивности L и сопротивлений r и R .

Из этих кривых можно видеть, какое значение принимает как ток, так и напряжение на конденсаторе как при пуске, так и установившемся режиме. В некоторых случаях это построение приходится делать для полного и точного выяснения условий работы выпрямителя, однако значительно чаще можно пользоваться рядом упрощений и графиков.

Для этой цели разобьем нашу задачу на две части: 1) определение величин напряжения на конденсаторе и токов, проходящих через вентиль при пуске устройства в ход, или вообще при изменении режима работы, и 2) определение тех же величин при установившемся режиме.

8. Упрощенный способ определения токов и напряжений для случая 4-го при включении. Перенапряжения и перетоки.

В первом случае, т. е. при включении, как это видно из рис. 129а, 129б и 130, картина изменений напряжения на конденсаторе и токов очень разнообразна, причем значения токов и напряжений достигают больших величин, почему для

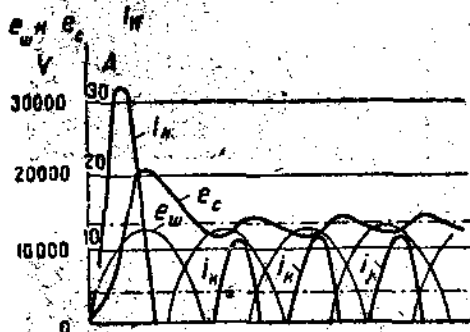


Рис. 129.

Данные контура: $L = 0,28$ Н, $C = 4 \mu\text{Ф}$,
 $R = 3000$ Ом, $E_m = 14500$ В и $f = 50$.

практики очень важно их определение. Рассмотрение кривых, отвечающих различным соотношениям между L , C , R и r , подобных рис. 129а, 129б и 130, показывает, что без большой погрешности в первом случае сложное построение по ур-ниям (86) и (97) может быть заменено весьма простым, если заменить включение выпрямительного устройства включением на тот же контур источника постоянной э. д. с. При этом величина этой э. д. с. должна быть выбрана равной величине V_p т. е. постоянной составляющей выпрямленного напряжения

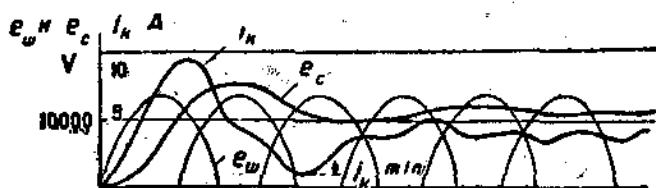


Рис. 129а.

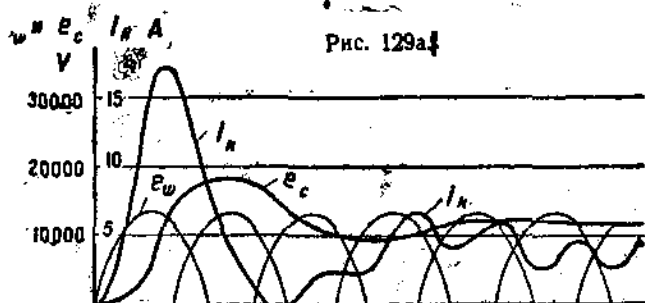
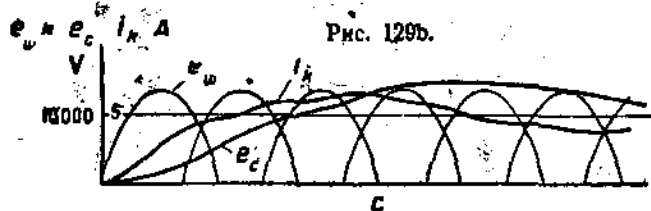


Рис. 129б.



с

Рис. 129 а, б и 130. Напряжение на конденсаторе e_c и ток, проходящий через выпрямитель i_k при включении.

Данные контура: (Рис. 129 а) — $\sigma = 314$; $C = 2 \mu F$; $L = 4,77$ Н; $\delta = 85,7$; $R = 3000 \Omega$; $f = 50$. (Рис. 129 б) — $\sigma = 314$; $C = 4 \mu F$; $L = 2,5$ Н; $\delta = 45,6$. (Рис. 130). $C = 4 \mu F$; $L = 18$ Н; $\sigma = 110$; $\delta = 42,2$; $R = 3000$.

устройства.¹ Иначе говоря, схема рис. 124 может быть заменена схемой рис. 131. Ошибка, которая вносится такой заменой, будет весьма мала, при числе фаз выпрямительного устройства большем трех, и падает с увеличением их числа. Далее она будет тем меньше, чем больше σ . Однако во всех практических случаях такая замена возможна. Для случая включения в цепь постоянного тока нас будут интересовать главным образом величины перенапряжений на конденсаторе, как влияющие на стоимость и размеры устройства, так и величины максимальных токов и перетоков. Эта последняя величина играет большую роль в смысле мгновенной нагрузки вентиля, особенно для вентиля, описанных в гл. III, ч. III.

¹ См. гл. I, ч. V.

Для максимальных напряжений и токов, при включении, в том случае, если источником э. д. с. будет динамомашинна или аккумуляторная батарея с напряжением равным V_g , можем написать:

$$e_{c\max} = V_g \left(1 + e^{-\frac{\delta}{\sigma}} \right); \quad (118)$$

$$i_{k\max} = I \left(1 + \frac{e^{-\frac{\delta}{\sigma}(\pi-\lambda)}}{2 \cos \lambda} \right), \quad (119)$$

где

$$\cotg \lambda = \frac{\delta}{\sigma} \quad (119a)$$

и

$$t_{\min} = 2\pi - \lambda; \quad (120)$$

$$i_{k\min} = I \left(1 - \frac{e^{-\frac{\delta}{\sigma}(2\pi-\lambda)}}{2 \cos \lambda} \right) \quad (121)$$

Здесь λ — фаза e_c относительно момента включения тока.

Наряду с величинами $i_{k\max}$ и $e_{c\max}$ выше мы дали также и величину $i_{k\min}$ (ур-ние 121). Эта величина играет весьма большую роль при работе выпрямителя, так как при $i_{k\min} = 0$ ток, проходящий через выпрямитель, на некоторое время прекращается, что оказывает, как увидим ниже, большое влияние не только на работу самого вентиля, но и на все выпрямительное устройство.

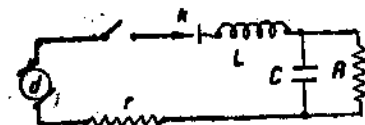


Рис. 131. Упрощенная схема, заменяющая принципиальную схему рис. 124 (4-й случай).

Если величина $i_{k\min} > 0$, то при рассмотрении всего выпрямительного устройства возможно не принимать во внимание вентили. Все устройство, состоящее из трансформатора и вентилей, может быть в этом случае заменено некоторой электродвижущей силой e'_{ω} вида, показанного на рис. 122, которая и работает на ту же цепь, что и выпрямительное устройство. В этом случае здесь возможно руководствоваться только лишь закономерностями, излагаемыми для установившегося режима в теории переменных токов, что конечно облегчает задачу. В том случае, если $i_{k\min} = 0$, то приходится уже принимать во внимание вентили, находящиеся в цепи, и устройство не может быть заменено эквивалентной э. д. с. e'_{ω} .

9. Зависимость $i_{k\max}$, $e_{c\max}$ и $i_{k\min}$ от $\frac{\delta}{\sigma}$

Рассматривая ур-ния (118), (119) и (121), не трудно заметить, что все эти величины зависят от отношения $\frac{\delta}{\sigma}$, почему на рис. 132 и дано построение их согласно ур-ниям (118), (119) и (121), в зависимости от этой величины. Из рис. 132 видно, что перенапряжения весьма быстро растут с уменьшением $\frac{\delta}{\sigma}$,

достигая при $\frac{\delta}{\sigma} = 0,05$ значений близких к 100% . То же самое надо сказать и про перетоки $i_{k\max}$, которые для того же значения близки к 800% , т. е. могут весьма сильно отразиться на работе вентиля. Кривая $i_{k\min}$ пересекает ось абсцисс около значения $\frac{\delta}{\sigma} = 0,2$, почему лишь при больших значениях $\frac{\delta}{\sigma}$ выпрямительное устройство и можно рассматривать, не принимая во внимание вентили и заменяя его некоторой эквивалентной э. д. с.

Все эти столь большие отклонения величин $i_{k\max}$, $e_{c\max}$ и $i_{k\min}$ при малых $\frac{\delta}{\sigma}$ находят объяснения в колебательном характере контура при этих условиях, режим которого с увеличением $\frac{\delta}{\sigma}$ переходит в апериодический, отвечающий условиям ур-ния (106). Не трудно видеть, что с точки зрения величин $i_{k\max}$, $e_{c\max}$ и $i_{k\min}$ этот переход совершается весьма плавно.

Так как величина $\frac{\delta}{\sigma}$ играет здесь очень важную роль, то необходимо на ней остановиться подробнее. Как это и было дано ур-нием (102),

$$\frac{\delta}{\sigma} = \frac{0}{2\pi} \quad (122)$$

иначе говоря, кривые рис. 132 могут быть построены в функции логарифмического декремента, который и играет здесь решающую роль.

При предварительных расчетах выпрямительных устройств весьма важно быстрое определение величины $\frac{\delta}{\sigma}$, почему здесь на рис. 133 и даны графики для определения $\frac{\delta}{\sigma}$. Весьма часто при малых нагрузках, когда величиной нагрузки можно пренебречь, полагая $R = \infty$, достаточно определение величины $\frac{\delta}{\sigma}$. В этом случае приближенно можно принять:

$$\frac{\delta}{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{\left(\frac{\mu_1}{R} + \frac{r}{\mu_1}\right)} - 1}} \approx \frac{r}{2\mu_1} \quad (123)$$

Здесь, как и ниже, мы обозначаем волновое сопротивление $\sqrt{\frac{L}{C}}$ через μ_1 (здесь C — в фарадах и L — в генри), r — сопротивление вторичной обмотки

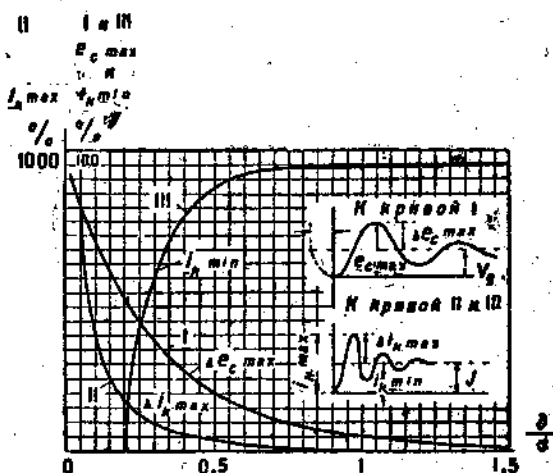


Рис. 132. Переток, перенапряжение и уменьшение тока при включении в зависимости от $\frac{\delta}{\sigma}$

трансформатора и всей цепи нагрузки до конденсатора. На рис. 133 даны зависимости $\frac{\delta}{\sigma}$ от сопротивления нагрузки R при различных μ_1 , принимая $r = 50$ ом.

При сопротивлениях $R < 10\,000$ ом $\frac{\delta}{\sigma}$ мало зависит от r , почему в этом случае график рис. 133 пригоден и при r отличных от 50 ом. Рис. 133 показывает, что при малых нагрузках, т. е. при больших значениях R , путем увеличения волнового сопротивления μ_1 невозможно получить достаточно большие

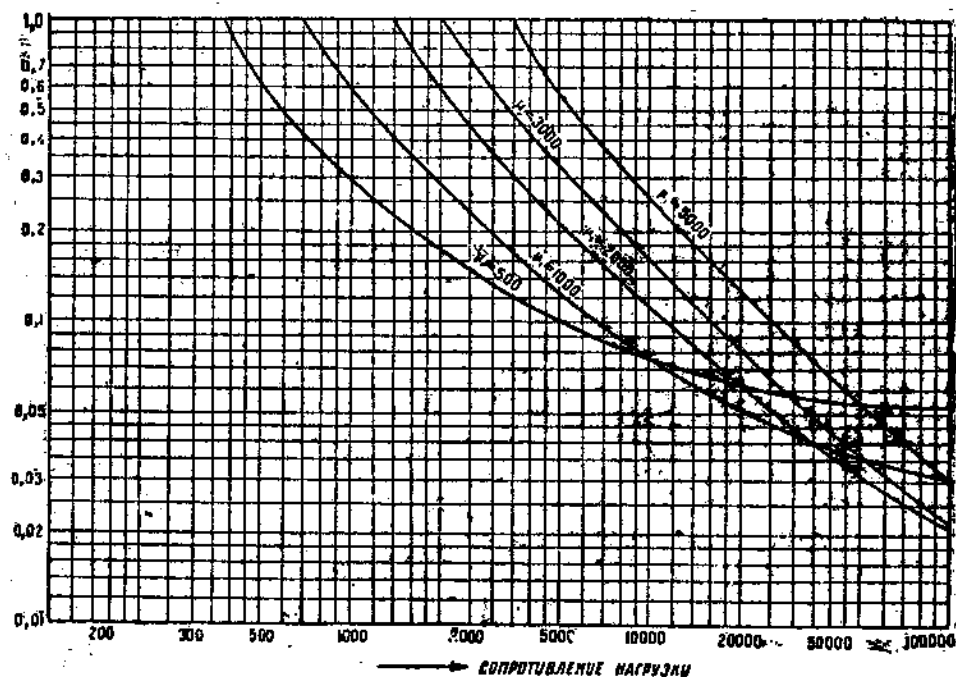


Рис. 133. Зависимость величины $\frac{\delta}{\sigma}$ от сопротивления нагрузки R при разных значениях волнового сопротивления μ_1 .

значения $\frac{\delta}{\sigma}$, т. е. избежать перенапряжений и перетоков. Однако этого же возможно достигнуть весьма легко, даже и при малых значениях μ_1 , путем увеличения нагрузки или уменьшения R .

Так как на практике большинство выпрямительных устройств приходится пускать без нагрузки, т. е. при $R = \infty$, то, как видно из рис. 132 и 133, путем подбора величин μ_1 трудно получить отсутствие перенапряжений.

10. Пуск кенотронных устройств

Из ур-ния (123) видно, что полезную роль здесь может сыграть величина сопротивления r . При больших значениях r , как это мы имеем у кенотронов,

величина $\frac{\delta}{\sigma}$ получается почти при всех условиях достаточно большой; кроме того ток насыщения при выключении дает быстрое возрастание r с током, поэтому перенапряжения здесь и не опасны.

11. Пуск ртутных выпрямительных устройств с жидким и накалившимся катодом. Ступенчатый выключатель.

Совсем другое положение вещей мы имеем у ртутных выпрямителей как с жидким катодом, так и с накалившимся, типа Rectron.

Так как этого рода высоковольтные устройства обладают весьма малым падением напряжения вентилей и это падение не носит характера омического сопротивления, т. е. не зависит практически от нагрузки, то приходится пусковые приспособления снабжать устройствами, не допускающими образования перенапряжений и перетоков. У мощных ртутных выпрямителей опасность возрастает с увеличением напряжения установки, так как вол-

нозное сопротивление $\mu_1 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ при этом увеличивается из-за увеличения индуктивности L . Этого рода установки получают распространение для питания электрической тяги.

Для избежания перенапряжений и перетоков, здесь целесообразно применение ступенчатого рубильника, включающего в первый момент пуска последовательно с первичной или вторичной обмоткой трансформатора некоторое сопротивление r_1 , которое складывается с величиной r — сопротивления обмоток трансформатора. Через несколько секунд это сопротивление r_1 замыкается рубильником накоротко. Время между первым и вторым замыканием зависит от постоянных линии или цепи и устанавливается путем реле времени.

Сделаем подсчет сопротивления ступенчатого выключателя для следующих данных цепи:

$$C = 2 \mu\text{F}; L = 9 \text{ H}; r = 20 \text{ }\Omega \text{ и } R = 12\,000 \text{ }\Omega,$$

если перенапряжение и переток не должны превосходить, первый 22% от V_g и второй 300% от I_g . Из кривой рис. 132 находим, что первое условие удовлетворяется при величине $\frac{\delta}{\sigma} = 0,5$. В этом случае переток будет всего лишь 200%, т. е. первое требование перекрывает второе.

Для μ_1 имеем:

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{L}{C}} = 1\,000 \sqrt{\frac{9}{2}} \approx 2\,130, \quad (124)$$

и из ур-ния (123) получаем для требуемого сопротивления r , состоящего из сопротивления трансформатора и сопротивления ступенчатого выключателя

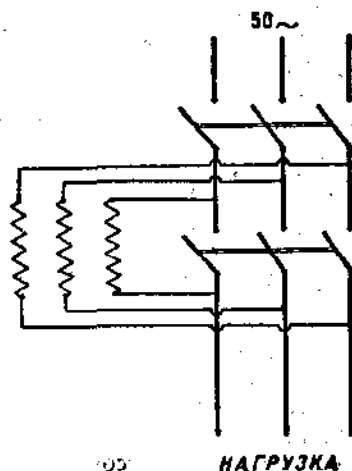


Рис. 134. Схема ступенчатого выключателя для пуска ртутных выпрямителей без появления перенапряжений.

$r + r_1 = \frac{\delta}{\sigma} 2\mu_1 = 0,5 \times 2 \times 2130 = 2130$ ом, откуда для сопротивления ступенчатого выключателя получаем: $r_1 = 2130 - 20 = 2110$ ом, т. е. порядка 2000 ом.

Схема ступенчатого выключателя дана на рис. 134.

12. Токи и напряжения для случая 4-го при установившемся режиме.

Как мы видели в предыдущем параграфе, при нагрузке, отвечающей случаю 4-му, токи и напряжения при включении устройства значительно отличаются от тех токов и напряжений, которые были нами получены в гл. I, 2, ч. IV для работы, отвечающей случаю 1-му. Так же точно и при установившемся режиме, т. е., когда величина внешнего сопротивления R не меняется, мы также имеем для величин токов и напряжений значения, отличные от данных в том же параграфе. Однако в некоторых случаях данные для токов и напряжений могут быть легко найдены, как это будет показано ниже, из обычных соотношений техники переменных токов, отвечающих установившемуся режиму. В этом случае приходится лишь, как это мы уже делали и раньше, взять в качестве электродвижущей силы, заменяющей все выпрямительные устройства, некоторую пульсирующую э. д. с., например вида, показанного на рис. 99. При этом возможно совершенно не принимать во внимание наличие самих вентилях. Их существование нашло уже отражение в самой замене синусоидальных кривых многофазной системы указанной выше пульсирующей э. д. с.¹

В других случаях задача является более сложной и замена выпрямительного устройства пульсирующей э. д. с. уже невозможна. Здесь приходится все время считаться с неустановившимся режимом, который вносится вентилями. Пример такого рода устройств может быть получен при малых нагрузках устройства и значительной величине частоты свободных колебаний ω . На рис. 129, отвечающем устройству высокого напряжения, имеющему следующие данные для цепи нагрузки: $L = 0,28$ генри, $C = 4$ микрофарды, $R = 3000$ ом, $E_m = 14\,500$ вольт и $f = 50$ пер/сек видно, что ток i_k за один период несколько раз принимает значение равное нулю. В этом случае невозможно уже пользоваться соотношениями, данными в главе I, ч. V, даже и для постоянной составляющей выпрямленного напряжения V_k .

При определении тока и напряжения в случае установившегося режима для случая 4-го и при условии $i_k > 0$, мы можем принимать во внимание лишь низшую гармонику, даваемую данным устройством, имеющую круговую частоту $\omega_m = 2\pi m/f$, где m число фаз; что касается других высших гармоник, то в большинстве случаев мы можем их отбросить.

Так как сопротивление всей цепи, показанной на рис. 124, будет равно:

$$Z_m = \sqrt{\left(r + \frac{A}{A^2 + (\omega_m C)^2}\right)^2 + \left(\omega_m L - \frac{\omega_m C}{A^2 + (\omega_m C)^2}\right)^2},$$

¹ К такого рода установившимся режимам относятся все, при которых ток i_k не принимает значений, равных нулю. Здесь значение выпрямленного напряжения V_k может быть вычислено по уравнению (160) или взято из таблицы 39. Точно так же здесь для постоянной составляющей выпрямленного тока мы в праве пользоваться выражением $I_k = \frac{V_k}{R}$. Ниже будут даны условия для сохранения током i_k величины, большей нуля.

то амплитуда тока гармоники с частотой ω_m получится из уравнения:

$$I_m = \frac{V_m}{Z_m}, \quad (125)$$

где V_m — амплитуда напряжения низшей гармоники. Величина V_m может быть взята из таблицы 41 для данного числа фаз, так как мы сейчас рассматриваем те соотношения, которые имеют место в том случае, если не принимать во внимание рассеяния трансформатора при *отсутствии индуктивности в анодных цепях*. Что касается амплитуды напряжения низшей гармоники, на конденсаторе C , то ее величина будет равна:

$$V_{cm} = I_m Z_{1m} = \frac{V_m Z_{1m}}{Z_m}, \quad (126)$$

где

$$Z_{1m} = \frac{1}{\sqrt{A^2 + \omega_m^2 C^2}} \quad (127)$$

Если мы в написанных выше формулах пренебрежем проводимостью отвечающей цепи полезной нагрузки, т. е. примем $A = 0$, то при условии $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ получим для амплитуды тока низшей гармоники значение:

$$I_m \cong \frac{V_m}{\omega_m L} \quad (128)$$

и для амплитуды напряжения низшей гармоники

$$V_{cm} = I_m Z_{1m} \cong \frac{I_m}{\omega_m C} \cong \frac{V_m}{\omega_m^2 LC}; \quad (129)$$

откуда также можем написать, подставляя значение $\sigma = \frac{1}{\sqrt{LC}}$,

$$V_{cm} = \frac{V_m \sigma^2}{\omega_m^2} \quad (130)$$

В задачах, которые ставятся практикой, обычно указывается не величина амплитуды низшей гармоники, а процентное отношение этой амплитуды к постоянной составляющей напряжения выпрямленного тока, т. е. дается отношение:

$$P_v = \frac{V_{cm}}{V_g} 100\%. \quad (131)$$

Это выражение может быть определено из уравнения (129) и таблицы 41.

На рис. 135 даны значения величины P_v в функции σ как для трехфазной схемы, так и для шестифазной. Как и ранее эти кривые не учитывают индуктивности в анодах, что для радиотелеграфных схем близко к действительности.

График рис. 135 дает возможность, задаваясь теми пульсациями, которые допускает установка, определить частоту собственных колебаний системы σ или величину произведения LC .

Для расчета катодного дросселя L_k , показанного на рис. 70, необходимо определение переменной составляющей тока низшей гармоники I_m данной уравнением:

$$I_m = \frac{V_m}{Z_m}.$$

Однако для удобства расчетов здесь мы также дадим не величину амплитуды этого тока, а отношение этой амплитуды к постоянной составляющей выпрямленного тока I_g , т. е. величину $P_i = \frac{I_m}{I_g}$. Подставляя в это выражение значение из уравнений

$$I_m = V_{cm} \omega_m C \quad (132)$$

$$I_g = \frac{V_g}{R},$$

получим:

$$P_i = P_o RC \omega_m \quad (133)$$

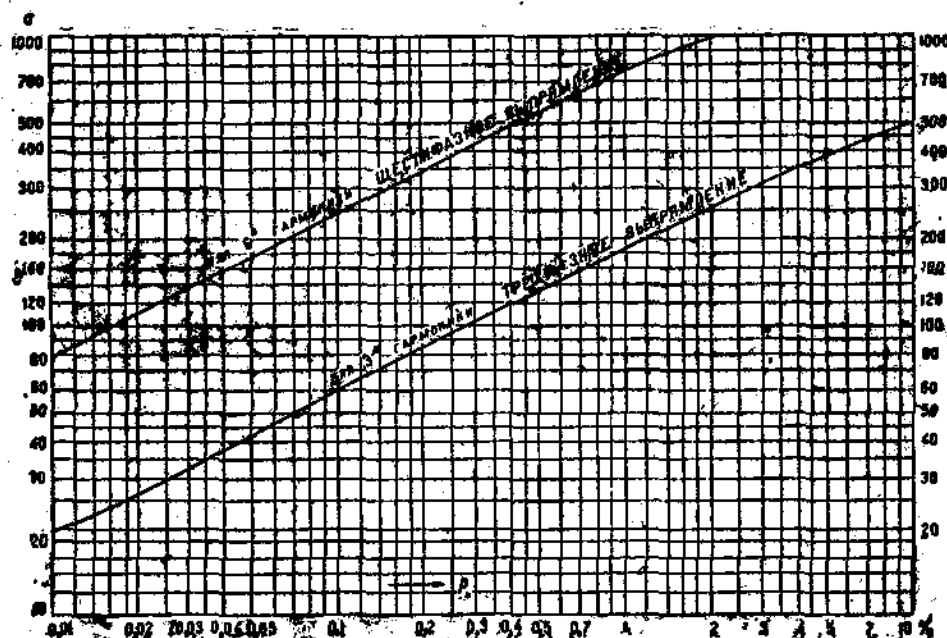


Рис. 135. Зависимость процентного отношения P_o [напряжения амплитуды гармоники V_{cm} к постоянной составляющей m -ой выпрямленного напряжения $V_g (P_o = \frac{V_{cm}}{V_g} \times 100)$] от величины σ для трех- и шестифазной схемы выпрямления.

Из последнего выражения видно, что при данных элементах цепи пульсации тока будут связаны с пульсациями напряжения на конденсаторе, кроме того эта величина будет определяться величиной произведения RC и круговой частотой ω_m . На рис. 136 приведена зависимость процентных пульсаций напряжения на конденсаторе от пульсации тока той же гармоники для различных величин RC для трехфазного выпрямления.

Как это будет показано ниже в гл. I, ч. V, использование трансформатора и вообще расчет вторичной его обмотки зависит от эффективного значений

тока каждого анода; в виду этого определим эффективное значение тока, отвечающего рассмотренному выше случаю. Для этой цели допускаем, как и ранее, что форма кривой выпрямленного тока содержит только гармонику с частотой ω_m , почему мы можем написать для переменной составляющей тока, показанной на рис. 137, следующее выражение:

$$i_{\text{эф}} = I_m \sin x,$$

где $x = m\omega t$.

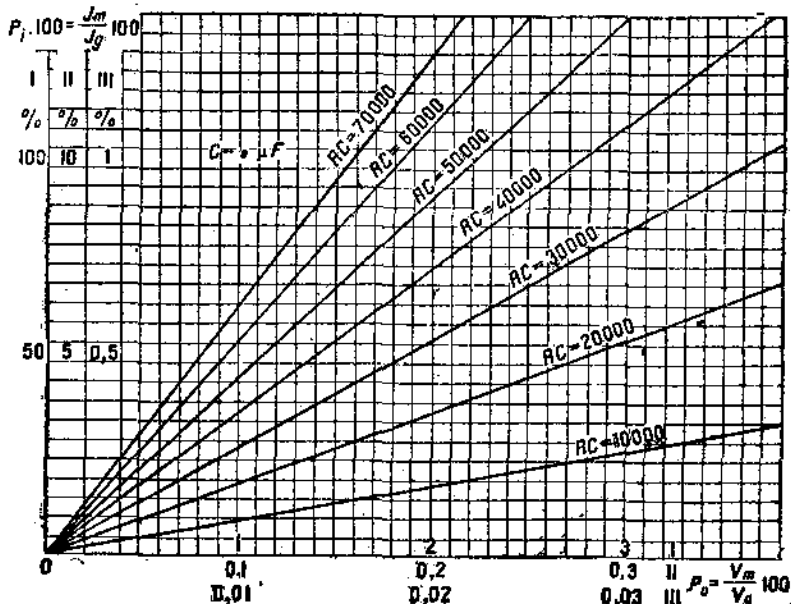


Рис. 136. Зависимость процентных пульсаций напряжений на конденсаторе от пульсации тока той же гармоники для различных значений RC для трехфазного выпрямления.

Выпрямленный ток может быть написан в виде

$$i_k = I_g + I_m \sin x.$$

Эффективное значение выразится так:

$$I_{g\text{эф}} = \sqrt{\frac{\int_0^{2\pi} (I_g + I_m \sin x)^2 dx}{2\pi}}, \quad (134)$$

ткуда

$$I_{g\text{эф}} = I_g \sqrt{\frac{2 + P_i^2}{2}}. \quad (135)$$

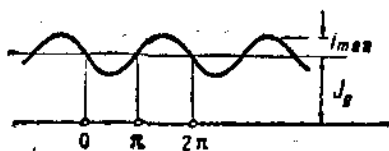


Рис. 137. Кривая выпрямленного тока при учете лишь m -ой гармоники.

Выражение $\sqrt{\frac{2 + P_i^2}{2}}$ есть не что иное, как коэффициент формы кривой выпрямленного тока, который обозначаем через k_i ; в этом случае: $I_{g\text{эф}} = I_g k_i$. Если $P_i = 1$, т. е. амплитуда m -ой гармоник тока как раз равна среднему

значению выпрямленного тока ($I_m = I_d$), то

$$k_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 1,22.$$

Найдем теперь эффективное значение фазного тока $I_{1\phi}$. Как это следует из формулы, данной ниже

$$I_{1\phi} = \frac{I_{g\phi}}{\sqrt{m}} = I_g \sqrt{\frac{2 + P_i^2}{2m}}.$$

В том случае, если бы выпрямитель работал без фильтра на чисто омическое сопротивление, то при большом числе фаз мы были бы в праве пользоваться формулой $I_{1\phi} = \frac{I_g}{\sqrt{m}}$, без добавочного множителя $\sqrt{\frac{2 + P_i^2}{2}}$.

Рассмотрение этого последнего позволяет сказать, что при I_m , больших нуля, в худшем случае мы имеем увеличение эффективного значения анодного тока на 22%; это обстоятельство необходимо принимать во внимание при расчете трансформатора и определении типовой мощности его, данной в гл. I, ч. V и в таблице 39.

Так как все выше сказанное относится, как мы это уже неоднократно упоминали, к случаю, когда i_k больше нуля, то необходимо здесь определить те условия, которые должны быть выполнены для сохранения условия: $i_k > 0$, или $P_i < 100\%$; это условие нетрудно написать из уравнения (133), в виде

$$RC < \frac{100}{\omega_m P_u}, \quad (136)$$

где C выражено в фарадах. Если C выразить в микрофарадах, то условие напишется в виде

$$RC < \frac{10^8}{\omega_m P_u}. \quad (137)$$

Значения RC , при которых происходит разрыв тока, мы назовем критическими. На графике рис. 138 эти критические значения для трехфазной и шестифазной схемы определяются прямыми, начерченными пунктиром и штрихпунктом, причем за абсциссы взята величина σ .

На осциллограммах, представленных на рис. 128, 129, не трудно заметить, что с возрастанием величины $\frac{\delta}{\sigma}$ меняется величина перетоков и перенапряжений, а также величина $i_{\min}$. Эта последняя величина определяет собою уменьшение тока i_k при пуске; что касается установившегося режима, то на тех же осциллограммах можно заметить, что и с возрастанием величины RC , пропуски в токе прекращаются, и уменьшаются величины пульсаций выпрямленного тока.

Если коснуться режима, выходящего за пределы описанного выше, иначе говоря — рассматривать токи и напряжения при разрыве выпрямленного тока, то мы можем лишь сказать, что постоянная составляющая напряжения V_g в этом случае возрастет.

Так как этот режим, согласно изложенному выше, будет иметь место при малых нагрузках, т. е. при весьма больших величинах R , то при увеличении нагрузки, иначе говоря — при значительном уменьшении величины R , мы из вто-

рого режима перейдем в режим первый. Отсюда следует, что величина V_a будет меняться с изменением нагрузки. Эти колебания не могут быть выражены никаким фильтром, так как последний не оказывает влияния на постоянную составляющую выпрямленного напряжения.

Из сказанного выше следует, что если желательно сохранить постоянство выпрямленного напряжения, то нужно избегать (даже при холостом режиме, т. е. отжатом ключе) режима, отвечающего условию:

$$RC > \frac{100}{\omega_m P_v}$$

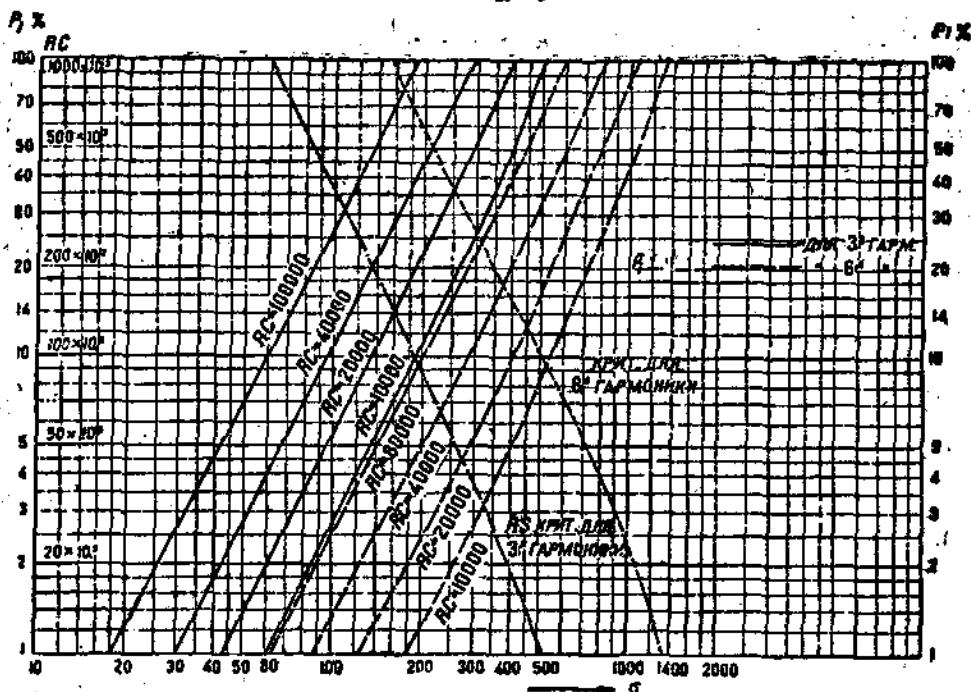


Рис. 138. График для разрыва тока при разных значениях RC .

Необходимо сказать, что при этом последнем режиме величина эффективного значения тока каждого анода может по отношению средней арифметической тока приобретать весьма большие значения, а значит трансформатор в этом случае может получить, согласно сказанному далее в гл. I, ч. V, весьма большое нагревание вторичной обмотки или его приходится брать весьма больших размеров, и с этой точки зрения работа при режиме, отвечающем условию $i_k = 0$, также не желательна. Однако это последнее обстоятельство относится лишь к тому случаю, когда величина $i_k = 0$ при полной нагрузке, а не при отжатом ключе.

13. Ток и напряжения для случая 4-го при включении и выключении нагрузки.

Этого рода режим обычно имеет место при питании выпрямительным устройством радиотелефонного или радиотелеграфного передатчика. Для простоты

мы рассмотрим здесь лишь телеграфную работу, так как телефонный режим можно в большинстве случаев привести также к некоторому телеграфному.

При нажатом ключе через выпрямитель проходит нормальный ток, отвечающий некоторому внешнему сопротивлению R . При отжатии ключа нагрузка уменьшается, и величина R заменяется некоторой другой величиной $R_0 > R$.

В данном случае нас будет интересовать, как и ранее, напряжение на конденсаторе и анодные токи в переходный период изменения нагрузки. Для переходного режима мы можем воспользоваться еще уравнением для неустановившегося режима, данным в гл. I, § 5, ч. IV. В качестве источника тока для простоты мы возьмем постоянную электродвижущую силу, равную V_g .

Если сопротивление внешней нагрузки будет меняться от R до R_0 , то токн будут меняться от I до I_0 .

В этом случае для напряжения на конденсаторе и для силы выпрямленного тока, при переходе нагрузки с полной на частичную, получим:

$$e_c = \frac{V_g R_0}{R_0 + r} + e^{-\frac{\delta_0}{\sigma} x} (k \sin x + l \cos x) \quad (138)$$

и

$$i_k = \frac{V_g}{R_0} + e^{-\frac{\delta_0}{\sigma} x} (\alpha \sin x + \beta \cos x) \quad (139)$$

В начальный момент для $t=0$ мы будем иметь:

$$\frac{V_g R}{R+r} = \frac{V_g R_0}{R_0+r} + l \quad (140)$$

и

$$\frac{V_g}{R+r} = \frac{V_g}{R_0+r} + \beta \quad (141)$$

Зная величины l и β , легко найти k и α из соотношения:

$$k = \frac{\beta - l(A_0 - \delta_0 C)}{\sigma C} \quad (142)$$

и

$$\alpha = k(A_0 - \delta_0 C) - l \sigma C \quad (143)$$

Здесь, как и ранее: $A = \frac{1}{R}$, $A_0 = \frac{1}{R_0}$ и δ_0 — затухание. На основании сказанного построены по этим уравнениям кривые для цепи со следующими данными: $L=10$ генри, $C=1$ микрофарада. Первая отвечает переключению с $R=2000$ ом на $R_0=100\,000$ ом и вторая с $R=2\,000$ ом на $R_0=5\,000$ ом. Так как величина r мала сравнительно с величинами R и R_0 , то возможно для определения интересующих нас величин написать весьма простые выражения. Для этой цели мы обозначим через ΔI_g разность установившихся токов до выключения и после выключения $\Delta I_g = I_g - I_{g0}$, после чего можем написать:

$$k = \frac{\beta}{\sigma C} = \Delta I_g \mu_1 \quad (144)$$

и

$$e_c = V_g + \Delta I_g \mu_1 e^{-\frac{\delta_0}{\sigma} x} \sin x; \quad (145)$$

для первого максимума найдем:

$$x_1 = \arccotg \frac{b_0}{a}.$$

Так как R_0 во много раз больше R_1 , то множитель затухания невелик сравнительно с a , поэтому можно допустить, что первый максимум наступит при $x = \frac{\pi}{2}$. На основании этого перенапряжение в % от V_g выразится в виде:

$$\Delta e_c = \frac{e_{c \max} - V_g}{V_g} = \frac{\Delta I_{g \mu 1}}{V_{g0}} e^{-\frac{b_0}{a} \frac{\pi}{2}}. \quad (146)$$

Изменение величины перенапряжений на конденсаторе при разных значениях произведений $\Delta I_{g \mu 1}$ можно проследить на диаграмме рис. 139.

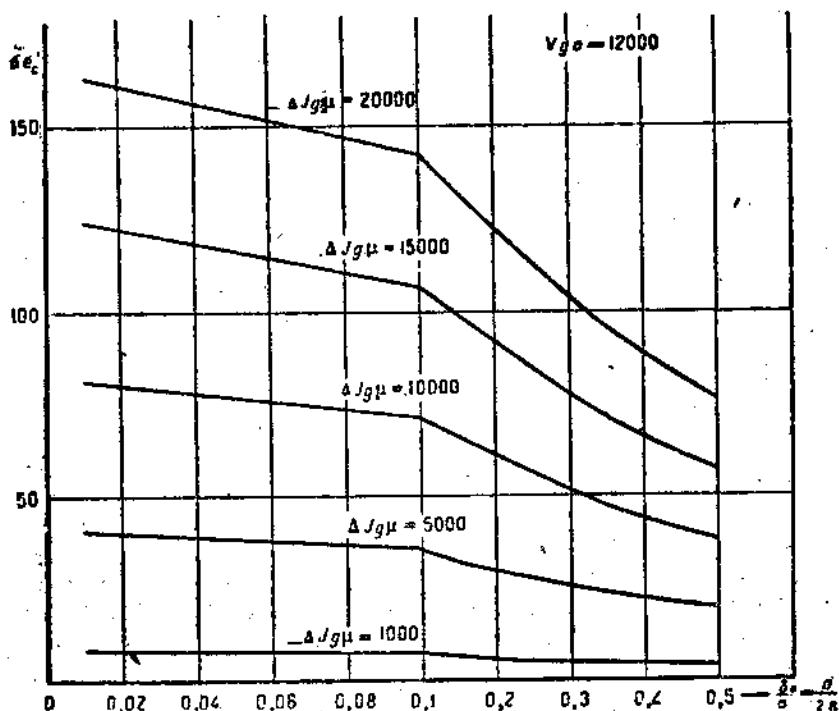


Рис. 139. Перенапряжения на конденсаторе Δe_c в % от выпрямленного напряжения V_g при частичном выключении нагрузки.

Они могут быть более 100% и особенно серьезны при переключении на холостую нагрузку. Увеличение C и уменьшение L благоприятно отражаются на перенапряженном режиме при выключении.

Определим условия непрерывности анодного тока. Прекращения тока не будет, если анодный ток в момент своего первого минимума удовлетворит соотношению $i_{k \min} \geq 0$.

В этот момент на основании сказанного выше: $e_c = V_{g0}$ и $x \cong \pi$.

Кроме того

$$i_b = i_e + i_R \quad (147)$$

и

$$i_e = \frac{de_c}{dx_e} = \left(-\frac{\delta}{\sigma} e^{-\frac{\delta_0}{\sigma} x} k \sin x + k e^{-\frac{\delta_0}{\sigma} x} \cos x \right) \sigma C \quad (148)$$

При $x = \pi$

$$i_e = -k e^{-\frac{\delta_0}{\sigma} \pi} \sigma C \quad (149)$$

и

$$i_R = \frac{V_{g1}}{R_0} \quad (150)$$

Условие отсутствия разрыва тока после преобразования примет вид:

$\frac{\delta_0}{\sigma} < 1 + e^{-\frac{\delta_0}{\sigma} \pi}$

$$\frac{R_0}{R} < 1 + e^{-\frac{\delta_0}{\sigma} \pi} \quad (151)$$

или:

$$\frac{I_R}{I_{g0}} < 1 + e^{-\frac{\delta_0}{\sigma} \pi} \quad (152)$$

Для значений $\frac{\delta_0}{\sigma} < 0,2$ возможно пользоваться упрощенным признаком:

$$\frac{R_0}{R} \cong \frac{I_R}{I_{g0}} < 2 + \frac{\delta}{\sigma} \pi \quad (153)$$

Кривые предельных значений $\frac{R_0}{R} \cong \frac{I_R}{I_{g0}}$ приведены на рис. 140.

Если условие (153) не удовлетворяется, то ток анодов оборвется, конденсатор начнет разряжаться через сопротивление R_0 , и выпрямитель вновь вступит в работу

Рис. 140. Зависимость отношения $\frac{R_0}{R} \cong \frac{I_R}{I_{g0}}$ от величины $\frac{\delta_0}{\sigma}$. (Предельные значения R_0 при которых происходит разрыв тока.)

в тот момент, когда e_c окажется ниже приложенного напряжения V_g на величину зажигающего потенциала. Если последний в виду неопределенности его величины положить равным нулю, то зажигание произойдет, когда:

$$e_{c \max} e^{-\frac{t}{R_0 C}} = V_g. \quad (154)$$

В таком случае число пропущенных фаз тока от момента наибольшего максимума напряжения до последующего зажигания ртутного выпрямителя приближенно можно вычислить из выражения:

$$n = \left[\frac{1}{\alpha_0} \lg_e \left(\frac{\Delta e_c}{100} + 1 \right) \right] : \frac{2\pi}{m\omega}, \quad (155)$$

где $\alpha_0 = \frac{1}{R_0 C}$ — множитель затухания и Δe_c — перенапряжение на конденсаторе в % от V_{gr} . Соответствующие кривые даны на рис. 141.

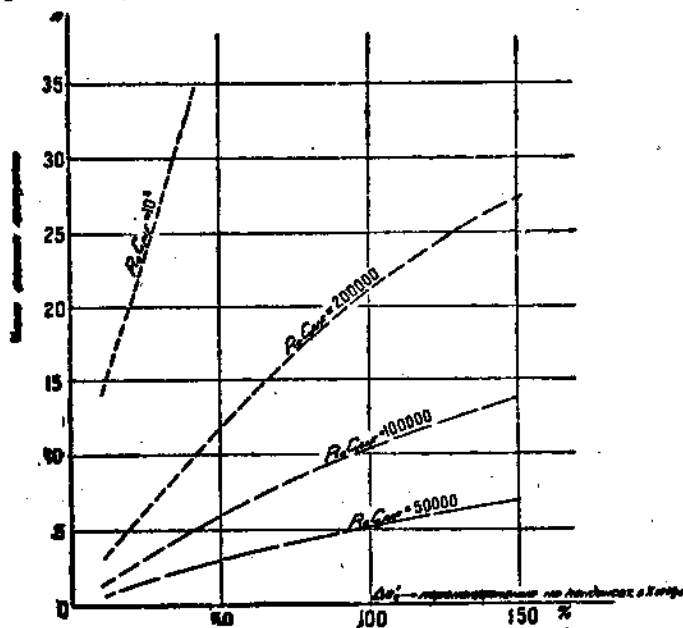
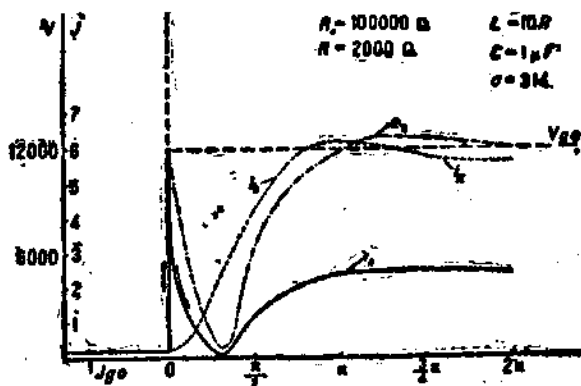


Рис. 141. Число фазных пропусков тока в зависимости от величины Δe_c (перенапряжение на конденсаторе в % от выпрямленного напряжения V_{gr}) при различных значениях $R_0 C$.

Переходный процесс при включении или вернее при переключении нагрузки с частичной на полную будет протекать по уравнениям того же вида, но с изменением фазы напряжения почти на 180° .

Кривые на рис. 142 характеризуют напряжения на конденсаторе и анодные токи при включении нагрузки.

Первая полуволна напряжения повернута вниз, перенапряжение же вследствие большого затухания оказывается значительно меньше, чем в предыдущем случае выключения. Значительное понижение напряжения и тока нагрузки может неблагоприятно отразиться на телеграфной передаче. При нажатии ключа сигнал может исчезнуть и даже исчезнуть. В приведенной осциллограмме впадина в токе и напряжении резко выражена, вследствие малой емкости контура: 1 микрофа-



рада при $L=10$ генри и $I_g=6$ амп. Уменьшение волнового сопротивления благоприятно отразится на режимах переключения нагрузки.

Первый минимум напряжения вычисляется приближенно по уравнению:

$$e_{c \min} = V_g - \Delta I_{g0} e^{-\frac{\delta}{\sigma}} \approx V_g - \Delta I_{g0} e^{-\frac{\delta}{\sigma} \frac{\pi}{2}}. \quad (156)$$

Здесь:

$$\Delta I_g = I_g - I_{g0},$$

$$\mu_1 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

и δ — затухание при полной нагрузке

Ток нагрузки

$$i_R = \frac{e_c}{R} \quad (157)$$

На осциллограмме рис. 143 показано, как будут изменяться e_c и i_R в случае включения нагрузки, когда еще не установился ток после включения.

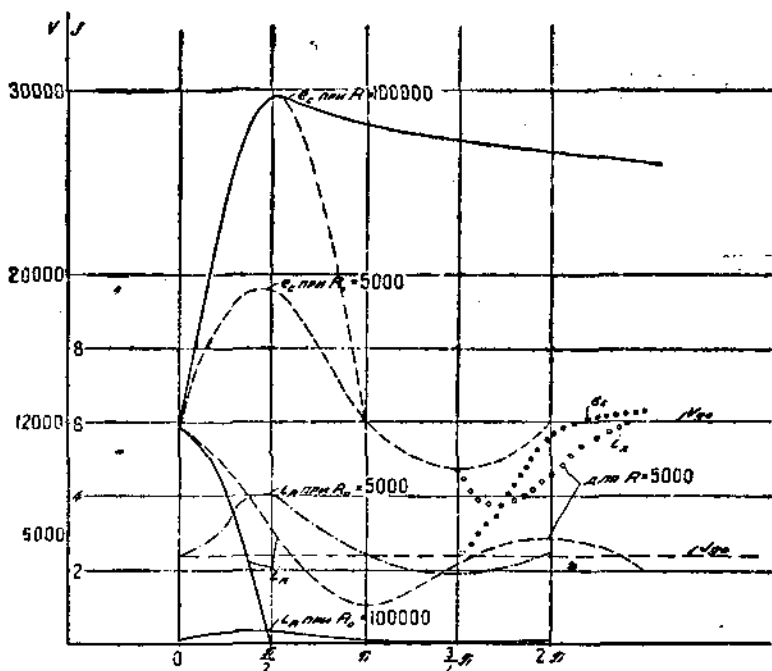


Рис. 143. Осциллограммы e_c и i_R при включении нагрузки (неустановившийся режим).

За начальный момент выбран момент первого минимума напряжения e_c .

Необходимо помнить, что кривые для определения перенапряжений по диаграмме рис. 139 построены для напряжения выпрямленного тока $V_g=12000$ вольт.

При другом напряжении V_{g1} найденную по этому графику величину надо умножить на отношение $\frac{V_{g1}}{12\,000}$.

При расчетах сглаживающих фильтров надо иметь в виду следствия, вытекающие из рис. 131 и 139, а именно, что увеличение емкости и следовательно уменьшение волнового сопротивления $\mu_1 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ в значительной степени улучшает процесс при включении и выключении нагрузки, в то время как при включении всей системы (фильтра и эквивалента нагрузки) на выпрямитель, уменьшение волнового сопротивления способствует повышению перенапряжений. Введение в цепь последовательно с L добавочного сопротивления r целесообразно в обоих случаях, так как оно увеличивает декремент затухания системы.

Следует помнить при этом, что предыдущие упрощенные формулы выведены и по ним построены графики в предположении, что r невелико по сравнению с R , эквивалентом полезной нагрузки. Кроме того не принимались во внимание потери в диэлектрике конденсаторов, что может быть легко учтено соответствующим изменением R .

Кривые на рис. 131 и 141, а также предыдущие уравнения с достаточной для практики точностью характеризуют явления при включении выпрямительной колбы на контур колебательного характера при разных нагрузках и дают возможность разрешить вопрос о целесообразном выборе емкости и самоиндукции фильтра. Результаты вычисления, как было уже указано, будут тем лучше, чем меньше σ и чем больше число фаз.

14. Условия устойчивой работы высоковольтной колбы для случая 4-го.

В параграфах с 5-го по 13-ий были рассмотрены условия работы многофазного устройства на емкость, в условиях случая 4-го как при включении, так и при установившемся режиме. Как из осциллограмм, так и из графиков можно видеть, что здесь возможны перенапряжения, перетоки и наконец пропуски в прохождении тока, когда $i_{k\min} < 0$. Эти пропуски могут иметь место не только для части периода, но для целых фаз нескольких периодов. Если перенапряжения, перетоки и пропуски не играют значительной роли в установках с кенотронами, в виду большой величины r из-за значительного внутреннего сопротивления кенотрона и вследствие независимости характеристики кенотрона от нагрузки, то для ртутных выпрямителей, особенно с жидким катодом, указанные явления играют большую роль. В выпрямителях с оксидным, твердым, накаливаемым катодом перетоки и перенапряжения имеют место в виду малого падения напряжения. Они могут вызвать более быстрое разрушение катода и обратное зажигание. Пропуски в прохождении тока здесь вредны лишь с точки зрения изменения напряжения V_g при переходе от малой нагрузки к полной. Никакого другого влияния на работу такого рода выпрямителя они оказать не могут.

Совершенно другое мы видим в ртутных высоковольтных выпрямителях с жидким катодом. Долгое время явления, описанные в упомянутых выше параграфах, препятствовали распространению ртутной системы выпрямления для питания ламповых передатчиков. Если в некоторых случаях такого рода устройства и работали хорошо, то это объяснялось скорее случайными особенностями установки, нежели правильным подходом к решению задачи. Главную роль здесь

в плохой работе играли пропуски в прохождении тока как при пуске, так и при работе и то обстоятельство, что та или другая нагрузка на колбу, или вернее тот или другой характер тока, проходящего через колбу, оказывает на характеристику ее, показанную на рис. 94 и 95, большое влияние. Иначе говоря, характеристика высоковольтной колбы не остается постоянной. Этим высоковольтная колба в значительной степени отличается от кенотрона и даже от ртутного выпрямителя с накалимым катодом. Изменение характеристики колбы, при той или другой реакции на нее схемы, заключается в изменении величины зажигающего потенциала e_p . Выше, в гл. II, 30, ч. III, было указано, что зажигающий потенциал в значительной степени может зависеть от зарядов на стенках анодных трубок, особенно при большой их длине. Так как для высоковольтных колб длина этих трубок может достигнут значительных размеров, то и влияние их на величину e_p велико. Однако заряды на стенках анодных трубок могут скопиться лишь в том случае, если по данной трубке продолжительное время не идет прямой ток, т. е. нет положительного столба, положительные ионы которого могут компенсировать заряды стенок трубок.

Таким образом решающую роль в увеличении зажигающего потенциала e_p играют пропуски в прохождении тока по той или другой фазе в течение нескольких периодов. С другой стороны из рис. 127 видно, что при увеличении зажигающего потенциала как-раз возрастает вероятность пропуска данной фазы в смысле прохождения тока. Вследствие этих обстоятельств имеют место часто наблюдавшиеся ранее случаи так называемого „перекоса“ колбы, т. е. постепенное мигание одного из рогов колбы, за которым следует полное прекращение тока по данной фазе, и наступления для нее как бы состояния „псевдовысокого вакуума“. Такая установка дает громадное понижение V_g , значительные пульсации переменной составляющей выпрямленного тока и полный выход установки из строя. До известной степени иногда удается понизить зажигающий потенциал наложением обкладок на анодные трубки согласно гл. II, 32, ч. III, но это средство далеко не всегда помогает и кроме того влечет за собой усиление распыления анодов.

Радикальным средством к получению совершенно устойчивой работы колбы, в условиях случая 4-го, можно считать лишь устройство такой схемы и подбор таких соотношений между величинами r , C , L и R , при которых пропуски в прохождении тока как при пуске устройства в ход, т. е. при аключении, так и при установившемся режиме, и наконец при изменении нагрузки во время манипуляции, не давали бы для величины $i_{k \min}$ значения, равного нулю. Иначе говоря, условием устойчивой работы колбы или благоприятной реакции схемы на колбу будет:

$$i_{k \min} > 0 \quad (158)$$

Как видно из графика, рис. 131, это условие будет соблюдено для включения при

$$\frac{\delta}{\sigma} > 0,2 \quad (159)$$

Это же условие даст отсутствие перенапряжений и перетоков при включении. Первые будут менее 50% V_g и вторые менее 200% I_g .

При установившемся режиме условие (158) будет соблюдено при выборе соотношения между $R \times C$ и $P_o = \frac{V_{cm}}{V_g}$, согласно графикам рис. 135 и 136. Что

касается манипуляции, то условие может быть соблюдено в том случае, если

$$\frac{I_g}{I_{g0}} < 1 + e^{\frac{\Delta \phi_k}{\sigma}},$$

как было показано в гл. I, 13, ч. IV. Из сказанного следует, что устойчивая работа колбы без пропусков фазы будет иметь место при соблюдении всех условий, охватывающих требование $i_{k \text{ min}} > 0$. Эти условия могут быть найдены из графиков рис. 131, 135, 136, 140, 142, 143. При ртутных выпрямителях с накатанным катодом и при кенотронах соблюдение этих условий хотя и не диктуется влиянием на характеристику, но также желательно, так как обеспечить для первых отсутствие перетоков, а значит и долговечность и даст постоянство V_g , а для кенотронов даст лишь постоянство V_g ; для последних выполнение условий в виду большой величины γ легче выполнимо, чем для ртутных выпрямителей.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.

1. Зависимость схемы от характера вентили и требований, предъявляемых к нему.

Для получения постоянного тока вентили могут быть включены самым разнообразным образом. Применение той или другой схемы включения зависит от следующих обстоятельств:

а) характера самого вентили, причем здесь играют роль его свойства при прохождении тока в прямом направлении, т. е. падение напряжения в нем или для некоторых вентилей его сопротивление; далее его свойства при режиме обратного напряжения как с точки зрения величины обратного тока (совершенный или несовершенный вентиль), так и с точки зрения обратного напряжения, которое вентиль может выдержать, не давая обратного зажигания;

б) стоимости вентили по отношению к стоимости трансформаторного устройства;

в) возможности в одном сосуде или колбе иметь при одном катоде один или несколько анодов;

г) требований, предъявляемых к выпрямленному току в смысле: 1) малых пульсаций переменной составляющей выпрямленного тока по амплитуде, 2) той или другой частоты этой переменной составляющей, 3) постоянства постоянной составляющей выпрямленного тока или падения напряжения при увеличении нагрузки;

д) продолжительности прохождения тока по каждому аноду;

е) использования трансформатора, питающего вентили;

ж) конструкции самого трансформатора.

Такая многообразность в предъявляемых требованиях вызвала разработку ряда схем, которые могут быть разбиты по их назначению на 3 группы.

1-я группа. Выпрямители малой мощности, у которого стоимость самого вентили играет меньшую роль, чем стоимость трансформатора и простота его.

2-я группа. Выпрямители стеклянные, средней мощности, напряжения до 500 вольт.

3-я группа. Выпрямители высокого напряжения, преимущественно для целей

питания анодов мощных ламп, назначенных давать ток большого постоянства с чрезвычайно малыми пульсациями.

4-я группа. Мощные силовые выпрямители, с трансформаторами большой стоимости, назначенные для напряжений до 3000 вольт.

2. Одновентильная схема (однофазная).

Простейшей схемой включения вентиля будет одновентильная схема, показанная на рис. 120. Эта схема пригодна лишь для малых выпрямителей, так как она дает прерывистый ток, как это показано на рис. 120. Отдача этой схемы весьма мала, особенно в случае применения для зарядки аккумуляторов, когда через них проходит и постоянная и переменная составляющие тока, а использована может быть лишь постоянная составляющая. Переменная составляющая создает лишь потери. При малых токах одновентильная схема может применяться в соединении с конденсатором для уменьшения пульсаций.

3. Двухфазная схема.

Схема с двумя вентилями или двухфазная схема (рис. 121) дает лучший результат, как использующая оба полупериода тока. Применение реактивной катушки в катод, описанное в гл. IV, 14, часть V, позволяет получить достаточно высокую отдачу. Применяется в малых выпрямителях со сравнительно ценным вентилем, каковы, например, пустотные вентили. Требуется трансформатор со средней точкой. Использование трансформатора невелико, как показано ниже в гл. I, ч. V.

4. Схема Грэца для однофазного тока.

Далее для получения использования обеих половин напряжения при малых выпрямителях, применяется схема Грэца, показанная на рис. 144. Эта схема, как видно, требует для однофазного тока (двухстороннее выпрямление) четыре вентиля, или по крайней мере три, если один из них имеет общий катод. Она дает хорошее использо-

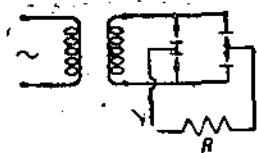


Рис. 144. Однофазная схема Грэца.

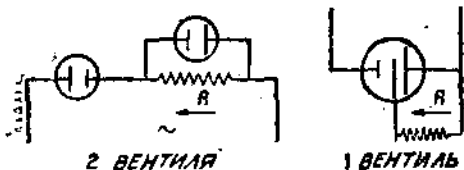
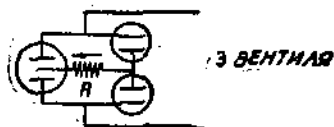


Рис. 145. Схема включения алюминиевых выпрямителей по Бэрсто.

вание трансформатора при нормальной его конструкции, без среднего вывода. При дешовых вентилях, каковы, например, оксидные, описанные в гл. IV, 2, 3, ч. II, она наиболее выгодна.

5. Схема для алюминиевых выпрямителей.

С алюминиевыми вентилями, имеющими большую емкость, могут применяться схемы Бэрсто (Bairsto), требующие для выпрямления обоих полупериодов меньшее число вентилях. На рис. 145 показаны два варианта этой схемы. Отдача ее мала.

6. Многофазные схемы.

Для выпрямителей средней мощности, обычно ртутных, со стеклянной колбой применяются многофазные схемы, как дающие сравнительно малые пульсации и несложную схему. На рис. 126 показана трехфазная схема, построенная по тому же принципу, как и схема двухфазная. В каждой фазе трансформатора здесь имеет место одно полупериодное выпрямление. Трансформатор требуется со средней точкой. От этой схемы ничем не отличается шестифазная схема, рис. 146.

Эта схема может быть образована путем соединения двух трехфазных трансформаторов средними точками. В этом случае, как увидим в гл. I, ч. V, трансформаторы будут находиться в худших условиях. Первичные обмотки трансформаторов для получения шестифазного выпрямления должны иметь у одного трансформатора включение звездой, а у другого треугольником.

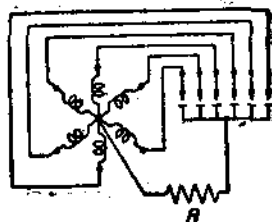


Рис. 146. Схема включения шестифазного выпрямителя.

7. Схема с засасывающим дросселем Кюблера (Kübler).

Шестифазное выпрямление может быть осуществлено также схемой, весьма близкой с предыдущей, а именно если средние точки трехфазных систем соединить не непосредственно друг с другом, а помощью „засасывающего дросселя“, к средней точке которого уже присоединена нагрузка. В этом случае получится лучшее использование трансформатора и главное вентилей за счет некоторого добавочного падения напряжения, которое имеет место при переходе от холостого хода к малой нагрузке. Более подробно эта схема и засасывающий дроссель описаны в гл. II, ч. V. Кроме применения в силовых установках схема применима при установках с кенотронами. Схема ее дана на рис. 147.

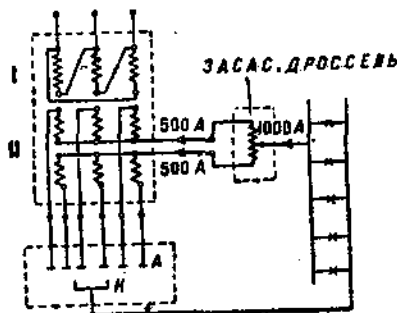


Рис. 147. Схема шестифазного выпрямления с засасывающим дросселем Кюблера.

8. Схемы для высоких напряжений.

Для высоких напряжений, применяемых в радиоустановках для питания анодов ламп, существует ряд схем, различающихся главным образом в зависимости от того, будет ли падение напряжения мало внутри вентилей, что имеет место в ртутных выпрямителях и вообще в ионных вентилей, или же падение будет сравнительно велико, как в кенотроне. При кенотронах и малых мощностях применяется обычная схема с двумя фазами, описанная ранее (рис. 121).

Эта схема особенно целесообразна при повышенной частоте. Неудобство ее при высоких выпрямленных напряжениях — весьма значительное напряжение на трансформаторе, так как обмотки работающей и холостой фазы включены последовательно.

9. Схема Грейнахера-Латура.

Для избежания последнего недостатка возможно с успехом применить схему Грейнахера (Greinacher), показанную на рис. 148. Здесь помню того, что вто-

ричная обмотка не нуждается в средней точке, напряжение трансформатора может быть вдвое меньшим, чем при схеме рис. 121. Трансформатор в этом случае лучше использован. Действие схемы основано на том, что трансформатор заряжает попеременно то тот, то другой конденсатор, которые относи-

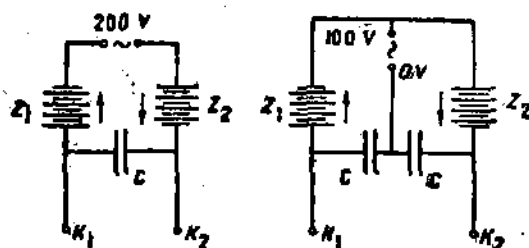


Рис. 148. Выпрямительная схема Грейнахера-Латура для полупериодного (левый рис.) и для полного (правый рис.) выпрямления.



Рис. 149. Трехфазная выпрямительная схема Латура.

тельно нагрузки включены последовательно. При этой схеме кенотроны могут быть взяты на приблизительно вдвое меньшее напряжение, чем в схеме рис. 121, но на вдвое больший ток. Размеры конденсаторов в этой схеме получаются значительными.

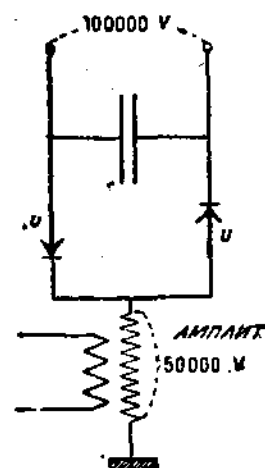


Рис. 150. Выпрямительная схема Делона.

По этому же принципу может быть построена и трехфазная схема, показанная на рис. 149. При малых токах и высоких напряжениях, порядка 10^5 вольт, возможна упрощенная схема Делона (Delon), показанная на рис. 150, с хорошим использованием трансформатора. Так как схемы Грейнахера основаны на том, что энергия, подаваемая за данный полупериод, идет не только на питание нагрузки, но и запасается в конденсаторе для питания нагрузки во время обратной фазы, то приемлемые размеры конденсаторов получаются при повышенных частотах, порядка 500 — 1000 пер/сек, где этого рода схемы и целесообразны.

10. Схемы при кенотронных и ртутных выпрямителях для радио-целей.

Более мощные кенотронные установки могут быть включены или по простой трехфазной схеме, рис. 122, что невыгодно в смысле больших пульсаций, или по шестифазной схеме, рис. 146. Однако значительно целесообразнее шестифазное включение с засасывающим дросселем по рис. 147, упомянутое выше. Здесь получается лучшее использование кенотронов, а также и трансформаторов. Эта схема и должна применяться при мощностях порядка 20 kW и выше, при кенотронах.

Ртутные выпрямители в применении их для питания ламповых передатчиков, как обладающие весьма малым падением напряжения внутри колбы, практически не зависящим от нагрузки, требуют других схем включения, чем кенотроны. Кроме того выпрямители с жидким катодом, как могущие иметь при одном катоде 3 и даже 6 анодов, более удобны при одних схемах, тогда как ртутные выпрямители с твердым, накаливаемым катодом типа Rectron требуют

других схем. Это связано с тем, что Rectron может изготавливаться повидимому лишь с одним анодом. Для ртутных высоковольтных выпрямителей, работающих на конденсатор, возможно пользоваться трехфазной схемой рис. 126.

11. Каскадные схемы.

Однако при выпрямленных напряжениях порядка 10 000 вольт и ртутных выпрямителях с жидким катодом целесообразнее применение каскадного включения, как дающего шестифазное выпрямление. Как видно из таблицы 31, обратное напряжение равно здесь половине того, которое при том же выпрямленном напряжении было у трехфазного устройства по схеме рис. 126. В каскадной схеме рис. 151 обе колбы работают последовательно, что однако не представляет неудобств при прохождении прямого тока, так как падение в колбах мало. Шестифазное выпрямление возможно здесь осуществить с 2 кол-

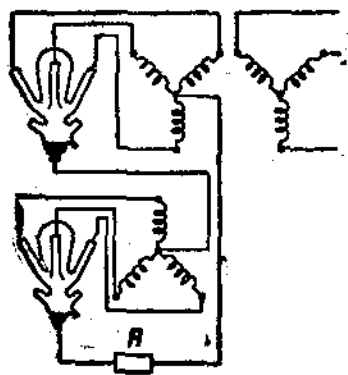


Рис. 151. Шестифазная каскадная выпрямительная схема Вольгодина.

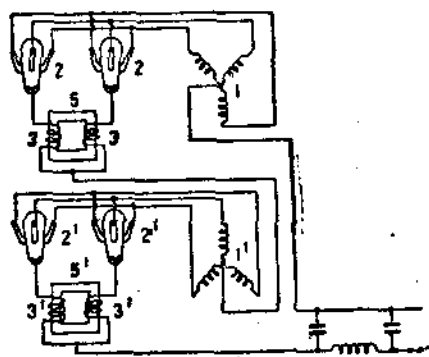


Рис. 152. Выпрямительная схема с параллельным включением анодов при каскаде с разделительной реактивной катушкой.

бами. Эта схема была предложена в 1921 г. автором и применялась трестом „Электросвязь“ в ряде мощных радиостанций СССР и за границей. При больших мощностях в случае каскадной схемы целесообразно параллельное включение анодов, согласно рис. 152. В этом случае необходимо включать в катоды уравнивательную катушку, совершенно необходимую при работе на конденсатор. Неудобство каскадной схемы состоит в том, что трансформатор в этом случае должен иметь две трехфазных вторичных обмотки, сдвинутые на 180° , имеющие каждая свой вывод. Эти вторичные обмотки должны быть изолированы одна от другой на полное выпрямленное напряжение. Использование трансформатора дано в гл. II, 3, ч. V, так же как и подробное его описание

12. Многофазная схема Грэца.

Каскадную схему включения возможно осуществить и другим путем, как это и предложил Грэк. На рис. 153 дана схема этого рода, дающая шестифазное выпрямление, с трехфазным трансформатором. Эта схема требует 6 отдельных вентилялей или по крайней мере 4, если один из них будет с 3 анодами. Пре-

имущество схемы: хорошее использование трансформатора, как это показано в гл. II, 4, ч. V. нормальная его конструкция и каскадное включение, т. е.

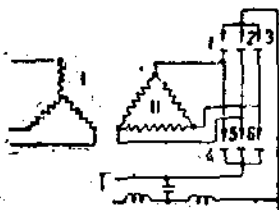


Рис. 153. Каскадная схема шестифазного выпрямления по Грэду.

уменьшение обратного напряжения на вентиль. В виду необходимости большого числа колб эта схема менее пригодна для ртутных выпрямителей с жидким катодом. Ряд этого рода схем может быть в свою очередь включен каскадом, в каком случае при надлежащем сдвиге фаз они могут дать 12-фазное выпрямление.

6-фазная схема Грэца однако весьма удобна при ртутных выпрямителях с накаливаемым твердым катодом, т. е. при Rectron'ах, в виду выполнения их с одним анодом, почему она и применяется фирмой Gen. El. Company для этого рода выпрямителей.

13. Схемы, применяемые в силовых ртутных выпрямительных установках.

Трансформаторы, применяемые для выпрямительных устройств, помимо перечисленных уже выше схем могут иметь целый ряд включений как со стороны первичной, так и вторичной их обмоток. Схема включения оказывает весьма большое влияние на работу не только самого трансформатора, но также и на работу всего выпрямительного устройства. В виду этого ниже мы и отметим главнейшие особенности наиболее употребительных схем включения трансформатора при работе их на выпрямитель.

а. Звезда — звезда, без нулевого провода в первичной обмотке. При этой схеме, как указано в гл. III, ч. V, имеет место магнитное рассеяние между железом ядра, так как ампервитки первичной и вторичной обмоток не уравновешены на каждом сердечнике. Это рассеяние имеет постоянное направление, почему и вызывает добавочное намагничивание и увеличение тока намагничивания. При выключении первичной обмотки трансформатора постоянный магнитный поток рассеяния исчезает, почему в этом случае получается значительное искрообразование. Так как переменная составляющая рассеяния между ядром сравнительно невелика, при этой схеме не получается большого добавочного падения напряжения.

б. Звезда — звезда с нулевым проводом в первичной обмотке не имеет недостатков предыдущей схемы. Практически не применяется из-за отсутствия в большинстве установок обратного нулевого провода.

в. Треугольник — звезда применяется наиболее часто, так как здесь не будет пульсирующей утечки между ядром.

г. Звезда — зигзаг не вызывает никаких неудобств в смысле рассеяния между ядром и могла бы считаться весьма удобной схемой, если бы не увеличенная реакция рассеяния вторичной обмотки трансформатора, являющаяся следствием большего чем у других схем числа вторичных витков. Последние имеют число витков равное $\frac{2}{\sqrt{3}}$, если принять за единицу витки при включении звездой.

Реакция вторичной обмотки в виду этого больше на 34%. *Треугольник — зигзаг* в основном сходен с предыдущей схемой.

е. Звезда — двойная звезда дает при шестифазном выпрямлении наиболее ярко выраженное рассеяние между ядром. Поток этого рассеяния переменный, почему и вызывает большое падение напряжения. По этой причине эта схема

и не употребительна. При полной нагрузке, правда, использование трансформатора достаточно хорошо.

Для избежания сказанного недостатка возможно снабжение трансформатора добавочной вторичной обмоткой, включенной треугольником, работающей лишь на себя и сглаживающей пульсации потока рассеяния. При этой обмотке использование трансформатора падает до пределов схемы включения, следующей за данной.

Другим способом, сохраняющим хорошее использование трансформатора, будет снабжение его добавочными двумя железными сердечниками, увеличивающими рассеяние между одним и другим ярмом. В этом виде система по существу ничем не отличается от описанной ниже схемы с засасывающим дросселем, содержа все недостатки и достоинства последней.

г. Треугольник — двойная звезда не имеет рассеяния между ярмом. Использование трансформатора и вентиля при этой схеме плохое, так как первичная обмотка препятствует, вследствие возникновения в ней неравномерных токов, образованию потока рассеяния между ярмом. Эта схема включения употребляется, не смотря на сказанное выше, весьма часто.

г. Звезда — двойной зигзаг не имеет рассеяния между ярмом. В последнем смысле эта схема не только не уступает, но даже несколько превосходит схему с вторичной обмоткой двойной звездой. Реакция рассеяния вторичной обмотки здесь имеет большую величину, достигающую той же величины, как и при схеме трехфазного зигзага. Эта схема разработана Крэмером (Krämer) и весьма часто применяется фирмой AEG.

г. Треугольник — двойной зигзаг не отличается от предыдущей схемы и столь же часто применяется.

и. Звезда — двойная звезда с засасывающим дросселем (дроссель Кюблера). Кроме указанного выше применения для кенотронов (гл. II, 7) эта схема употребляется весьма часто фирмой BBC для мощных выпрямителей. Достоинство ее — хорошее использование трансформатора, так как эта шестифазная схема может быть разделена на две трехфазных. Однако падение напряжения при переходе от холостого хода к полной нагрузке здесь составляет около 15%. Это падение имеет место уже при весьма небольшой нагрузке, почему при ее дальнейшем увеличении напряжение сохраняется достаточно постоянным.

к. Треугольник — двойная звезда с засасывающим дросселем ничем не отличается от предыдущей схемы, почему также часто употребляется.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ТОКАМИ И НАПРЯЖЕНИЯМИ В СХЕМЕ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ГЛАВА ПЕРВАЯ

СООТНОШЕНИЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ ИНДУКТИВНОСТИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ И АНОДНЫХ ЦЕПЯХ.

1. Постоянная и переменная составляющая выпрямленного тока при отсутствии катодного дросселя.

(Случай 1-й, гл. I, ч. IV).

Для правильного подсчета элементов схемы выпрямления переменного тока необходимо точно знать соотношения в ней между токами и напряжениями.

Выведем эти соотношения при любом числе фаз переменного тока в предположении, что нагрузка выпрямителя чисто омическая, отвечающая случаю 1-му, гл. I, ч. IV. Кроме того всеми внутренними сопротивлениями, а следовательно, и падениями напряжения в них, не исключая и падения в самом выпрямителе, пренебрегаем, так же как и рассеяниями обеих обмоток трансформатора, т. е. не принимаем во внимание перекрытия токов отдельных фаз.¹ Подводимое к выпрямителю напряжение переменного тока считаем чисто синусоидальным.

При этих предположениях искомые соотношения в напряжениях легко найти путем разложения в ряд Фурье выпрямленного напряжения для различного числа фаз, которое обозначаем через m .

Действительно ряд Фурье дает:

$$\left. \begin{aligned} \text{для } m=1 \quad e &= 0,318 E_m + 0,5 E_m \sin(\omega t + \varphi_1) + \\ &\quad + 0,212 E_m \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots \\ \text{„ } m=2 \quad e &= 0,636 E_m + 0,424 E_m \sin(2\omega t + \varphi_2) + \\ &\quad + 0,085 E_m \sin(4\omega t + \varphi_4) + \dots \\ \text{„ } m=3 \quad e &= 0,827 E_m + 0,207 E_m \sin(3\omega t + \varphi_3) + \\ &\quad + 0,047 E_m \sin(6\omega t + \varphi_6) + \dots \\ \text{„ } m=4 \quad e &= 0,904 E_m + 0,120 E_m \sin(4\omega t + \varphi_4) + \\ &\quad + 0,028 E_m \sin(8\omega t + \varphi_8) + \dots \\ \text{„ } m=6 \quad e &= 0,955 E_m + 0,055 E_m \sin(6\omega t + \varphi_6) + \\ &\quad + 0,013 E_m \sin(12\omega t + \varphi_{12}) + \dots \\ \text{„ } m=12 \quad e &= 0,989 E_m + 0,014 E_m \sin(12\omega t + \varphi_{12}) + \\ &\quad + 0,003 E_m \sin(24\omega t + \varphi_{24}) + \dots \end{aligned} \right\} (160)$$

где E_m — амплитуда фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

¹ О влиянии перекрытия токов см. гл. IV, ч. V.

² Однофазный трансформатор с выпрямлением одной полувольты.

³ Однофазный трансформатор с выпрямлением двух полувольт.

Как известно, первый член ряда соответствует постоянной составляющей напряжения, а все последующие дают амплитуды и фазы гармоник.

Поэтому, имея налицо приведенные разложения, можно не только сразу найти интересующие нас соотношения напряжений, но и судить о качестве выпрямления.

Графически влияние числа фаз на форму кривой выпрямленного напряжения, разлагаемого нами в ряд, может быть представлено рис. 154.

Для примера найдем постоянную составляющую выпрямленного напряжения V_g для того случая, когда E будет эффективным значением фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора. При нормальном шестифазном выпрямлении V_g определится из разложения в ряд для $m=6$ в виде:

$$V_g = 0,955 E_m = 0,955 \sqrt{2} E = 1,346 E.$$

Интересующее нас отношение между этими величинами будет равно: $\frac{V_g}{E} \approx 1,35$, или обратная ему величина:

$$\frac{E}{V_g} = 0,74.$$

Аналогично можно найти искомые соотношения напряжений V_g и E для другого любого числа фаз. Кроме вышеозначенного метода нахождения постоянной составляющей выпрямленного напряжения из рядов, его значение можно найти из уравнения:

$$V_g = E_m \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}; \quad (160 \text{ а})$$

см. аналогичное уравнение (161) на стр. 212.

Результаты сведены в таблицу 39.

ТАБЛИЦА 39.

Число фаз	E/V_g	V_g/E	Число фаз	E/V_g	V_g/E
1	2,22	0,45	6	0,74	1,35
2	1,11	0,9	12	0,72	1,39
3	0,855	1,17	∞	0,71	1,41
4	0,79	1,27			

Кроме величины постоянной составляющей выпрямленного напряжения, весьма важно знать также и переменную его составляющую. Последняя может быть разбита на ряд гармоник, величина которых находится непосредственно из вышеприведенных разложений.

Для вычислений иногда бывает значительно удобнее иметь значение гармоники, взятое не от максимального или эффективного значения напряжения фазы вторичной обмотки трансформатора, но от постоянной составляющей выпрямленного напряжения.

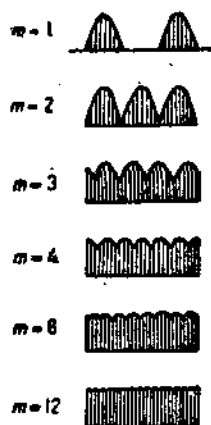


Рис. 154. Влияние числа фаз на форму выпрямленного напряжения.

Для примера определим амплитуду напряжения третьей гармоники при трехфазном выпрямлении в предположении, что $V_g = 1$.

Как это следует из разложения в ряд Фурье, амплитуда третьей гармоники равна:

$$V_{3\omega} = 0,207 E_m.$$

Откуда же имеем:

$$V_g = 0,827 E_m,$$

т. е.

$$V_{3\omega} = \frac{0,207}{0,827} = 0,25.$$

Результат аналогичных подсчетов сведен в таблицу 40.

Таблица 40.

№№ гармоник m	Частота гармоник при $f = 50$	Амплитуда гармоники V_m при $V_g = 1$	№№ гармоник m	Частота гармоник при $f = 50$	Амплитуда гармоники V_m при $V_g = 1$
1	50	1,570	9	450	0,025
2	100	0,667	12	600	0,014
3	150	0,250	16	800	0,0079
4	200	0,133	18	900	0,0062
6	300	0,057	24	1 200	0,0035
8	400	0,032			

Приведенные в таблице цифры дают амплитуду гармоники независимо от числа фаз и схемы выпрямления.

2. Соотношения между выпрямленным током и током фазы или анода.

Форма кривой выпрямленного тока, при отсутствии в его цепи каких бы то ни было реактивных катушек и емкостей, аналогична форме кривой выпрямленного напряжения. При m -фазном выпрямлении кривую выпрямленного тока можно представить состоящей из участков, изображенных на рис. 155-а. Совершенно очевидно, что на один период переменного тока приходится m таких участков.

Среднее значение тока формы, изображенной на рис. 155-а, может быть аналитически выражено следующим уравнением:

$$I_g' = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}} I_{\max} \sin \alpha \, d\alpha = \frac{1}{\pi} I_{\max} \sin \frac{\pi}{m}, \quad (161)$$

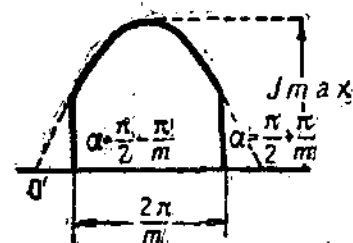


Рис. 155-а. Кривая анодного тока m -фазного выпрямителя.

а постоянная составляющая выпрямленного тока:

$$I_g = m I'_g = \frac{m}{\pi} I_{\max} \sin \frac{\pi}{m}. \quad (162)$$

Эффективное значение тока формы рис. 155-а или, что то же, тока, протекающего через анод выпрямителя, в свою очередь можно найти из уравнения:

$$I_{2\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}} I_{\max}^2 \sin^2 \alpha \, d\alpha} = \frac{I_{\max}}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}, \quad (163)$$

а то же значение выпрямленного пульсирующего тока соответственно выразится равенством:

$$I_{g\text{эф}} = \frac{I_{\max}}{2} \sqrt{\frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}. \quad (164)$$

Из выведенных формул легко найти все интересующие нас отношения между токами в отдельных частях схемы.

Так, если в цепь анода выпрямителя и в цепь выпрямленного тока включить тепловые приборы, то по показаниям последних получим следующие соотношения:

$$\frac{I_{2\text{эф}}}{I_{g\text{эф}}} = \frac{\frac{I_{\max}}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}}{\frac{I_{\max}}{2} \sqrt{\frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\pi}}}{\sqrt{\frac{m}{\pi}}} = \frac{1}{\sqrt{m}}. \quad (165)$$

При включении в цепь выпрямленного тока приборв типа Дебрэ, а в цепь анода теплового прибора, получим:

$$\frac{I_{2\text{эф}}}{I_g} = \frac{\frac{I_{\max}}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}}{\frac{m}{\pi} I_{\max} \sin \frac{\pi}{m}} = \frac{\sqrt{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}{2m \sin \frac{\pi}{m}}. \quad (166)$$

Практически, особенно при применении большого числа фаз, разница между эффективным и постоянным значениями выпрямленного тока настолько незначительна, что обычно пользуются выведенным выше соотношением $I_{2\text{эф}} = \frac{I_{g\text{эф}}}{\sqrt{m}}$,

принимая под $I_{g\text{эф}}$ — постоянную составляющую выпрямленного тока. Это допущение можно иллюстрировать следующей простой выкладкой.

Вычислим I_g и $I_{g\text{эф}}$ для $m=3$.

$$\text{Имеем: } I_g = \frac{3}{3,14} \times 0,866 I_{\max} = 0,827 I_{\max},$$

$$I_{g\text{эф}} = I_{\max} \times 0,5 \sqrt{\frac{3}{3,14} \times (0,866 + 2,093)} = 0,84 I_{\max},$$

$$\frac{I_{g\text{эф}}}{I_g} = \frac{0,84}{0,827} = 1,015,$$

т. е. действующее значение выпрямленного тока уже при трехфазном выпрямлении больше постоянной его составляющей всего лишь на 1,5%.

Сравнительно значительная разница между I_g и $I_{g\phi}$ получается лишь в случае применения схемы однофазного выпрямления с использованием одной и обеих полуволн. Здесь в первом случае $\frac{I_{g\phi}}{I_g} = 1,57$, а во втором $\frac{I_{g\phi}}{I_g} = 1,11$.

На основании изложенного составлена таблица 41.

Таблица 41.

Число фаз	Отношение $\frac{I_{2\phi}}{I_{g\phi}} = \frac{1}{\sqrt{m}}$	Число фаз	Отношение $\frac{I_{2\phi}}{I_{g\phi}} = \frac{1}{\sqrt{m}}$
1	1,00 (1,57) ¹	4	0,50
2	0,71 (0,785)	6	0,41
3	0,58	12	0,29

Практически в подавляющем большинстве случаев выпрямительное устройство для сглаживания пульсаций выпрямленного тока работает с включенной в провод катода выпрямителя самондукцией значительной величины. При этом кривая выпрямленного тока оказывается почти прямой линией, параллельной оси абсцисс. Поэтому для упрощения выкладок и построений можно с достаточной степенью точности принять форму кривой анодного тока за прямоугольник с высотой, равной постоянной составляющей тока, и основанием, соответствующим времени прохождения тока, как это следует из рис. 155-б. Сделанное допущение не вносит изменений в выведенные нами соотношения между токами, причем в этом случае уже без всяких оговорок:

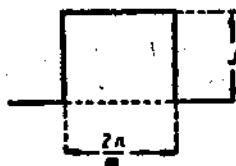


Рис. 155-б. Упрощенная кривая анодного тока m -фазного выпрямителя.

$$\frac{I_{2\phi}}{I_g} = \frac{1}{\sqrt{m}}.$$

3. Использование вторичной обмотки трансформатора.

Зная соотношения между постоянными составляющими тока и напряжения с одной стороны и эффективными их значениями для фазы трансформатора с другой, весьма просто найти, на какую мощность должна быть рассчитана по нагреву вторичная обмотка трансформатора, работающего на выпрямитель по нормальной многофазной схеме.

Под коэффициентом использования вторичной обмотки трансформатора k_2 будем подразумевать отношение между мощностью выпрямленного тока без пульсаций W_g к мощности $W_{\omega''}$, которую должен дать трансформатор в том случае, если бы он был нагружен нормально переменным током при условии равенства потерь в обоих случаях.

¹ В скобках дано отношение: $\frac{I_{2\phi}}{I_g}$.

Таким образом:

$$k_2 = \frac{W_g}{W_{\pi}} = \frac{I_g V_g}{E I_{2\text{эф}} m} = \frac{I_g \frac{\pi}{\pi} E_m \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{E_m}{\sqrt{2}} \frac{I_g}{\sqrt{m}} m} = \frac{\sqrt{2m}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}. \quad (167)$$

В частном случае коэффициент k_2 можно вывести, пользуясь готовыми цифрами, взятыми из таблиц.

Для примера определим k_2 для нормальной шестифазной схемы выпрямления, при условии включения первичной обмотки трансформатора треугольником.

Имеем:

$$k_2 = \frac{I_g V_g}{E I_{2\text{эф}} m} = \frac{I_g 1,35 E}{E I_g 0,41 \times 6} = 0,55.$$

Для расчетов обычно удобнее пользоваться величиной обратной k_2 . Эта последняя

$k'' = \frac{1}{k_2}$ прямо показывает, во сколько раз

большую мощностью должна обладать вторичная обмотка трансформатора, по сравнению с выпрямленной мощностью, отдаваемой устройством. Функциональная зависимость $k'' = f(m)$ дана на рис. 156. Из кривой видно, что при нормальных схемах многофазного выпрямления наибольшим использованием обладает трехфазная схема. Это же следует из таблицы 42.

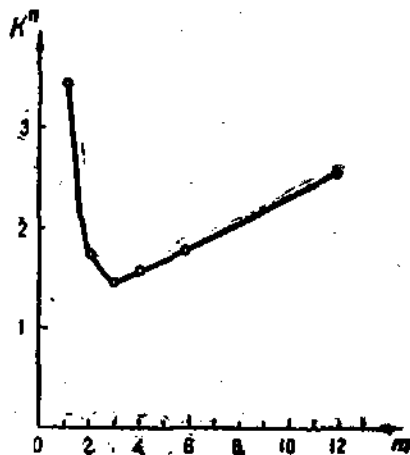


Рис. 156. Влияние числа фаз m на использование вторичной обмотки трансформатора $k'' = \frac{1}{k_2}$.

ТАБЛИЦА 42.

Число фаз	k''	k_2	Число фаз	k''	k_2
1	3,48	0,288	4	1,57	0,637
2	1,57 (1,74) ¹	0,637 (0,575)	6	1,81	0,55
8	1,49	0,67	12	2,5	0,40

4. Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора.

Обратимся к рассмотрению условий работы первичной обмотки трансформатора, питающего выпрямитель, причем намагничивающим его током пренебрегаем и коэффициент трансформации по виткам каждой фазы принимаем равным единице.

Прежде всего выведем основное положение, заключающееся в том, что трансформатор, будучи нагружен выпрямителем, может иметь постоянную со-

¹ Принимая во внимание пульсации выпрямленного тока.

ставляющую тока только во вторичной своей обмотке, первичная же его обмотка будет нагружена чисто переменным током, форма которого зависит от схемы включения.

Обозначим через e_1 и i_1 мгновенные значения напряжения и тока в первичной обмотке трансформатора, через ϕ_1 — мгновенное значение потока, через r_1 и N_1 — активное сопротивление и число витков первичной обмотки.

Тогда мы можем написать следующее дифференциальное уравнение электродвижущих сил:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} + r_1 i_1 = E_m \sin \omega t,$$

или

$$N_1 d\phi_1 + r_1 i_1 dt = E_m \sin \omega t dt. \quad (168)$$

Принтегрировав это уравнение почленно за период, получим:

$$N_1 \int_0^T d\phi_1 + r_1 \int_0^T i_1 dt = E_m \int_0^T \sin \omega t dt \quad (169)$$

или

$$0 + r_1 \int_0^T i_1 dt = 0; \quad (170)$$

так как r_1 ни в каком случае не равно нулю, то для соблюдения равенства необходимо, чтобы:

$$\int_0^T i_1 dt = 0, \quad (171)$$

а это может быть только при условии, что первичный ток не имеет постоянной составляющей.

Для определения формы кривой первичного тока обратимся к рассмотрению простейшей схемы выпрямления, изображенной на рис. 157.

Вторичный пульсирующий ток может быть выражен аналитически следующим уравнением:

$$i_2 = I_2 + I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2\omega t + \dots \quad (172)$$

Как доказано выше, первичный ток не может содержать в себе постоянной составляющей, т. е. в первичную обмотку трансформатора переносится лишь переменная составляющая вторичного тока, и i_1 может быть выражен уравнением:

$$i_1 = I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2\omega t + \dots \quad (173)$$

при условии, как это оговорено нами ранее, что коэффициент трансформации равен единице и что намагничивающим током мы пренебрегаем. Уравнение для i_1 показывает, что все гармоники вторичного тока имеют место и в первичном токе. Условие это легко выполнить, если принять форму кривой первичного тока такую же как у вторичного, сдвинув лишь нулевую линию на величину постоянной его составляющей, что и сделано на рис. 157.

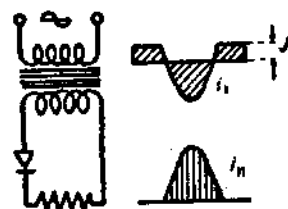


Рис. 157. Схема включения и формы токов обмоток трансформатора при одно-периодном выпрямлении.

Определим теперь формы кривых токов первичной обмотки трансформатора при различных схемах включения, принимая во внимание все допущения, сделанные нами ранее.

5. Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора для однофазного выпрямления при использовании обеих полуобмот.

Форма кривых токов: выпрямленного, каждого анода и первичной обмотки для этого случая даны на рис. 158 и не требуют пояснения. (Первичная обмотка распределена равномерно по двум кернам.) Определим для этой схемы коэффициент использования первичной обмотки:

$$k_1 = \frac{W_g}{W_w'}, \quad (174)$$

где

$$W_g = I_g V_g \text{ и } W_w' = I_{1\phi} E_m.$$

Из предыдущего известно, что $E = 1,11 V_g$.

Далее, так как мы приняли коэффициент трансформации по керну равным единице, то амплитуда первичного тока в два раза меньше амплитуды вторичного тока, что следует из условия необходимости магнитного равновесия трансформатора.

Кроме того при равенстве амплитуд первичного и анодного токов эффективное значение первого в $\sqrt{2}$ раз больше эффективного значения второго, так как первичный ток состоит из двух частей, по форме идентичных анодному току.

Таким образом:

$$k_1 = \frac{I_g V_g}{I_{1\phi} E_m} = \frac{I_g V_g}{I_{1\phi} \frac{\sqrt{2}}{2} 1,11 V_g 2} = \frac{I_g V_g}{0,785 I_g \sqrt{2} \times 1,11} = 0,815$$

или обратная величина:

$$k' = \frac{1}{k_1} = 1,23.$$

Отсюда также нетрудно вывести весьма полезное при расчетах соотношение:

$$\frac{I_{1\phi}}{I_g} = \frac{\sqrt{2} \times 0,785}{2} = 0,555.$$

6. Трехфазное выпрямление по схеме треугольник-звезда.

При включении первичной обмотки трансформатора треугольником ток каждой фазы его первичной обмотки не связан с токами других фаз. Сложение их происходит в линии, почему формы кривых линейного и фазного токов будут различны друг от друга. Нетрудно уяснить себе, что форма кривой

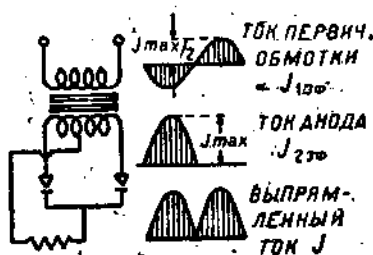


Рис. 158. Схема включения и формы токов обмоток трансформатора при двухполупериодном выпрямлении.

фазного тока первичной обмотки будет аналогична форме кривой анодного тока, но нулевая линия первого будет сдвинута относительно нулевой линии второго на величину постоянной составляющей последнего. Рассуждая о направлениях токов аналогично предыдущему, легко построить токи для двух оседлых фаз, а также и ток линии, что и выполнено на рис. 159.

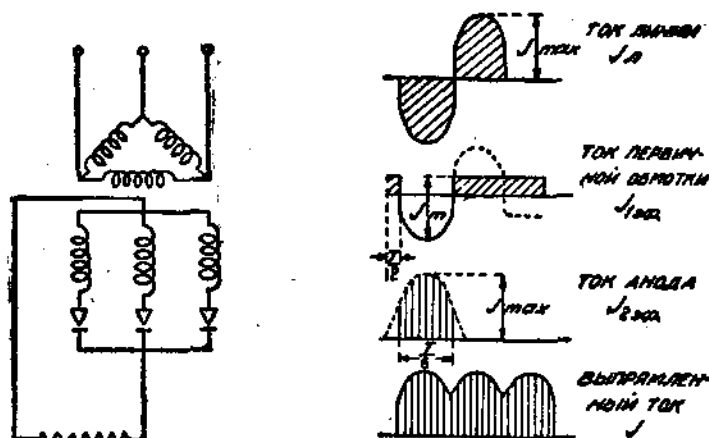


Рис. 159. Схема включения треугольник-звезда трехфазного трансформатора, работающего на выпрямитель, и формы токов обмоток трансформатора.

Определим коэффициент использования первичной обмотки трансформатора для этой схемы включения. Предварительно необходимо найти эффективные значения анодного тока и тока первичного. По предыдущему:

$$I_{2\phi} = \frac{I_{\max}}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)} = 0,485 I_{\max}. \quad (175)$$

Кроме того, как это ясно из рис. 159,

$$\int_0^T i_1 dt = 0 = -I_{\max} \int_{T/12}^{5/12 T} \sin \omega t dt + C \int_0^T dt = I_{\max} \frac{\sqrt{3}}{2\pi} T + CT, \quad (176)$$

откуда:

$$C = -I_{\max} \frac{\sqrt{3}}{2\pi}. \quad (177)$$

Кроме того в каждое мгновение:

$$i_1 - C = -i_2. \quad (178)$$

Поэтому для промежутка времени от $t = \frac{T}{12}$ до $t = \frac{5}{12} T$ можно написать:

$$i_1 = -I_{\max} \left(\sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \right). \quad (179)$$

Теперь нетрудно найти и соотношение между эффективным значением тока первичного и максимальным током вторичного. Действительно:

$$I_{1\text{эф}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_1^2 dt = \frac{1}{T} I_{\text{max}}^2 \left[\int_{T/12}^{5T/12} \left(\sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \right)^2 dt + \int_{5T/12}^{13T/12} \frac{3}{4\pi^2} dt \right] = 0,159 I_{\text{max}}^2, \quad (180)$$

откуда окончательно

$$I_{1\text{эф}} = 0,398 I_{\text{max}}$$

$$\frac{I_{1\text{эф}}}{I_{2\text{эф}}} = \frac{0,398}{0,485} = 0,82. \quad (181)$$

Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора:

$$k_1 = \frac{I_g V_g}{I_{1\text{эф}} E m} = \frac{I_g V_g}{0,82 \times 0,58 I_g 0,855 V_g 3} = 0,825$$

или

$$k' = \frac{1}{k_1} = 1,21.$$

Отношение:

$$\frac{I_{1\text{эф}}}{I_g} = 0,58 \times 0,82 = 0,47.$$

7. Трехфазное выпрямление по схеме звезда-звезда.

Схема включения и формы кривых токов даны на рис. 160. Нас интересует форма кривой первичного тока. Найдем ее из условия магнитного равновесия трансформатора. По закону Кирхгофа сумма токов, разветвляющихся из какой-либо точки, равна нулю. Принимая за таковую нулевую точку первичной обмотки трансформатора, можно написать:

$$i_1' + i_1'' + i_1''' = 0. \quad (182)$$

Для магнитного равновесия многофазного трансформатора необходимо, чтобы сумма ампервитков на одном его керне равнялась сумме ампервитков на другом керне. Так как коэффициент трансформации по фазе нами принят за единицу, то, не принимая во внимание витков, можно написать:

$$i_1' + i_1'' = i_1''' = i_1'''. \quad (183)$$

при условии, что ток проходит по 1-й фазе выпрямителя, как это указано на рис. 160, сплошными стрелками. Решая написанные нами уравнения, легко найти:

$$\left. \begin{aligned} i_1'' &= i_1''' = \frac{1}{3} i \\ i_1' &= -\frac{2}{3} i \end{aligned} \right\}. \quad (184)$$

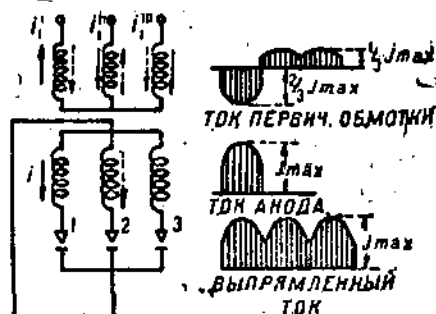


Рис. 160. Схема включения звезда-звезда трехфазного трансформатора, работающего на выпрямитель, и формы токов обмоток трансформатора.

Таким образом выходит, что в каждое мгновение по обмоткам двух фаз идет ток, равный трети мгновенного значения выпрямленного тока, а по третьей фазе ток, равный двум третям от него. Этими соображениями и диктуется форма кривой первичного тока $I_{1\text{эф}}$.

Определим коэффициент использования первичной обмотки трансформатора, для чего найдем сначала отношение $\frac{I_{1\text{эф}}}{I_{2\text{эф}}}$. На основании формулы (163) имеем:

$$I_{1\text{эф}} = \sqrt{\left(\frac{2}{3} I_{\max}\right)^2 \frac{1}{4} \left[\frac{1}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{3}\right)\right] + 2 \left(\frac{1}{3} I_{\max}\right)^2 \frac{1}{4} \left[\frac{1}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{3}\right)\right]} = 0,4 I_{\max},$$

так как кривая первичного тока состоит из одного участка, идентичного по форме току вторичному, но с амплитудой, равной $\frac{2}{3}$ от наибольшего значения вторичного тока, и из двух одинаковых участков с амплитудой, равной $\frac{1}{3} I_{\max}$. Кроме того на основании формулы (163):

$$I_{2\text{эф}} = 0,485 I_{\max}.$$

Таким образом

$$\frac{I_{1\text{эф}}}{I_{2\text{эф}}} = \frac{0,4}{0,485} = 0,82.$$

Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора:

$$k_1 = \frac{I_g V_g}{I_{1\text{эф}} E_m} = \frac{I_g V_g}{0,82 \times 0,58 I_g 0,855 V_g 3} = 0,825,$$

или

$$k' = \frac{1}{k_1} = 1,21.$$

Отношение:

$$\frac{I_{1\text{эф}}}{I_g} = 0,58 \times 0,82 = 0,47.$$

8. Шестифазное выпрямление по схеме треугольник-звезда.

При применении шестифазной схемы выпрямления включение обмоток каждого ядра аналогично нормальной схеме выпрямления однофазного тока, с той только разницей, что по каждой половине вторичной обмотки в первом случае ток идет в течение полупериода, а во втором случае в течение одной шестой доли периода. Этими соображениями и определяется форма кривой тока, текущего по первичной обмотке, а также и тока линии (рис. 161). Эффективное значение вторичного тока найдем, как и ранее, по формуле:

$$I_{2\text{эф}} = \frac{I_{\max}}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{6} + \frac{2\pi}{6}\right)} = 0,39 I_{\max}. \quad (185)$$

Совершенно очевидно, что эффективное значение тока первичного будет в $\sqrt{2}$ раз больше такового же для вторичного тока, т. е.

$$I_{1\text{эф}} = I_{2\text{эф}} \sqrt{2} = 1,41 \times 0,39 I_{\max} = 0,55 I_{\max}.$$

Поэтому коэффициент использования первичной обмотки трансформатора:

$$k_1 = \frac{I_g V_g}{I_{1\phi} E \times m} = \frac{I_g V_g}{0,41 \times \sqrt{2} I_g \times 0,74 \times V_g \times 3} = 0,78,$$

или обратная величина

$$k' = \frac{1}{k_1} = 1,28.$$

Отношение:

$$\frac{I_{1\phi}}{I_g} = 0,41 \sqrt{2} = 0,58.$$

Разобранные нами примеры определения коэффициента использования первичной обмотки трансформатора позволяют вывести общую формулу для его вычисления.

Действительно во всех случаях мы могли бы взять прямо коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора и умножить его на отношение эффективных значений токов вторичного и первичного.

Таким образом:

$$k_1 = k \frac{\sqrt{2m}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}, \quad (186)$$

где

$$k = \frac{I_{2\phi}}{I_{1\phi}}.$$

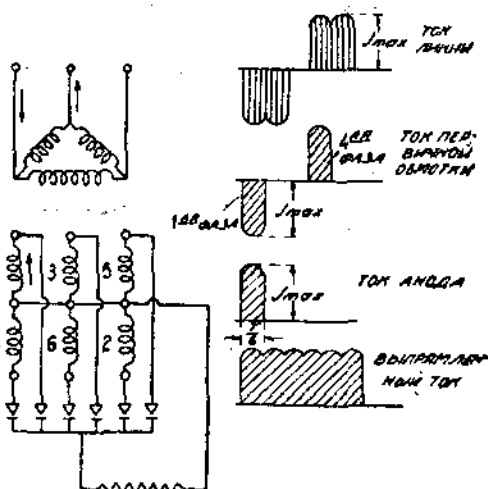


Рис. 161. Схема включения треугольник — шестифазная звезда трансформатора, работающего на выпрямитель, и формы токов обмоток трансформатора.

9. Типовая мощность трансформатора.

Под типовой мощностью трансформатора будем подразумевать мощность, на которую он должен быть рассчитан, чтобы отдать выпрямленную мощность $I_g V_g$ без повышения температуры обмоток выше допустимых пределов. При определении типовой мощности необходимо учесть увеличение потерь в обмотках трансформатора при работе его на выпрямитель по отношению к нормальным условиям его нагрузки в цепи переменного тока в виду того, что в первом случае ток по обмоткам идет лишь часть периода.

Иначе говоря, величина типовой мощности трансформатора получится как среднее арифметическое коэффициентов увеличения мощности первичной и вторичной обмоток, т. е.

$$k_T = \frac{k' + k''}{2}.$$

Определим k_T для случая трехфазного выпрямления по схеме треугольник-звезда. Имеем:

$$k_T = \frac{1,21 + 1,49}{2} = 1,35,$$

т. е. например, для того чтобы получить 100 kW выпрямленной мощности, нам необходимо взять нормальный технический трансформатор, по габариту отвечающий мощности в 135 kW.

Ни в каком случае не нужно думать, что типовая мощность имеет какое бы то ни было прямое отношение к коэффициенту полезного действия выпрямительной установки.

Необходимо точно уяснить, что повышенная мощность берется только из-за увеличенных эффективных значений токов при работе на выпрямитель и невозможности в трансформаторе нормального типа поместить обмотки с несколько большим сечением меди. Если мощность выпрямительной установки невелика, то иногда гораздо дешевле обойдется применение обычного силового трансформатора, который можно приобрести в виде готового изделия, чем специальный заказ заводу на изготовление трансформатора, рассчитанного на работу под выпрямитель. В этих случаях мощность трансформатора должна выбираться по коэффициенту использования его вторичной обмотки, которая ставит предел нагрузке. Первичная обмотка при этом будет значительно недогружена, и весь трансформатор в смысле нагрева будет иметь некоторый запас.

10. Линейный ток и коэффициент мощности.

При работе трансформатора на выпрямитель, даже при чисто синусоидальном напряжении сети переменного тока, ток линии будет сильно искаженным. Форма его кривой зависит от схемы включения обмоток трансформатора. Так как при включении первичных обмоток звездой ток их является и током линии, то в этом случае форма последнего будет идентична с формой тока первичной обмотки, а следовательно, и эффективные значения их будут равны. При включении же первичных обмоток треугольником токи отдельных фаз складываются в линии, следствием чего линейный ток будет разниться как по форме, так и по эффективному значению от тока первичной обмотки.

Для разобранных нами выше случаев включения (треугольник-звезда по трехфазной схеме и треугольник-звезда по шестифазной схеме) формы кривых токов линии даны на рис. 159 и 161. Обозначая через I_L эффективное значение тока линии, найдем для этих двух случаев весьма полезные при расчетах соотношения: $\frac{I_L}{I_g}$.

Для первого случая имеем:

$$I_L = \sqrt{2} I_{2\phi} = \sqrt{2} \times 0,58 I_g = 0,82 I_g$$

и для второго:

$$I_L = \sqrt{2} I_{1\phi} = 2 I_{2\phi} = 2 \times 0,41 I_g = 0,82 I_g$$

Благодаря искажению формы кривой первичного тока, вольтамперы сети, из которой трансформатор забирает мощность, будут больше, чем потребляемые им ватты.

Таким образом при расчетах выпрямительных устройств приходится считаться с коэффициентом мощности сети необычной природы.

11. Коэффициент мощности выпрямительного устройства.

Коэффициент мощности выпрямительного устройства для наглядности можно представить в виде произведения двух величин, которые физически имеют совершенно различную природу:

$$\xi = \mu \cos \varphi. \quad (187)$$

Первый член произведения можно назвать фактором искажения. Он не вызывает сдвига фаз между током и напряжением сети. Физически влияние его на сеть можно пояснить тем, что напряжение сети чисто синусоидально, а ток искажен. Последний можно разложить в ряд Фурье на основную и высшие гармоники. Мощность даст только первая гармоника тока, высшие же гармоники будут безваттными.

Второй член произведения есть собственно коэффициент мощности или фактор сдвига фаз, как его принято понимать в электротехнике. В выпрямительных установках он не значителен, и величина его диктуется рассеянием трансформатора и реактивными катушками, если таковые включены между зажимами вторичной обмотки и анодами выпрямителя. Здесь мы остановимся на рассмотрении лишь первого члена произведения, т. е. фактора искажения для нормальных схем выпрямления. Обозначим через $W_g = I_g V_g$ мощность выпрямленного тока, подсчитанную по постоянным слагающим напряжения и тока, через $W_0 = I_{g\phi} E_g$ — мощность выпрямленного тока, подсчитанную по эффективным их значениям, и через W_1 произведение вольт на амперы сети. Тогда фактор искажения

$$\mu = \frac{W_0}{W_1} \quad (188)$$

или

$$\mu = \frac{W_g}{W_1} \times \frac{W_0}{W_g} \quad (189)$$

На основании предыдущего:

$$I_{g\phi} = \frac{I_{\max}}{2} \sqrt{\frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}$$

Для E_g будем иметь точно такое же выражение.

Следовательно

$$W_0 = \frac{I_{\max} E_{\max}}{4} \left[\frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right) \right]. \quad (190)$$

Кроме того

$$I_g = \frac{m}{\pi} I_{\max} \sin \frac{\pi}{m}$$

и

$$W_g = \frac{m^2}{\pi^2} I_{\max} E_{\max} \sin^2 \frac{\pi}{m}.$$

Отсюда

$$\mu = \frac{W_g}{W_1} \frac{W_0}{W_g} = \frac{\frac{m}{4\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right) \frac{W_g}{W_1}}{\frac{m^2}{\pi^2} \sin^2 \frac{\pi}{m}} \quad (191)$$

ГЛАВА ВТОРАЯ.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПЯХ АНОДА.

1. Шестифазное выпрямление по схеме звезда-звезда с разделительным дросселем Кюблера.

Схема включения дана на рис. 162 и 147. Рассмотрим сначала кратко физическую картину работы схемы с разделительным дросселем.

Пусть в некоторый момент ток проходит по аноду первой фазы выпрямителя. В обмотке I разделительного дросселя он будет индуцировать э. д. с.,

противодействующую нарастанию тока, а в обмотке II — э. д. с., сдвинутую относительно индуктирующейся в обмотке I на 180° , т. е. увеличивающую потенциал анода второй фазы. По истечении весьма непродолжительного времени потенциалы анодов 1-й и 2-й фазы по отношению к катоду будут равны, и оба анода одновременно пропустят ток. При установившемся режиме одно-

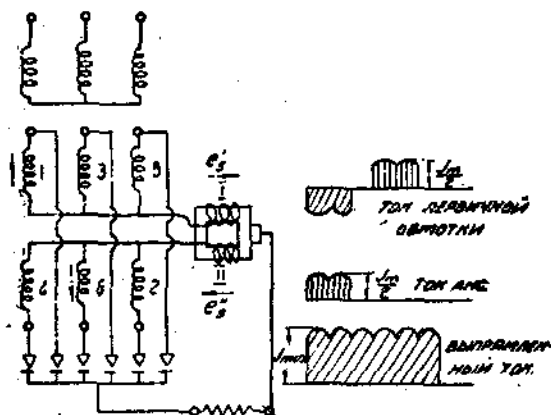


Рис. 162. Схема включения трехфазная звезда — шестифазная звезда с разделительным дросселем Кюблера для трансформатора, работающего на выпрямитель, и формы токов обмоток трансформатора.

разделительного дросселя совершает полный цикл своего изменения, то нетрудно сообразить, что частота этой э. д. с. будет тройной по отношению к частоте сети, так как, например, по обмотке I разделительного дросселя будет протекать ток 1-й, 3-й и 5-й фаз, причем продолжительность токопрохождения через каждую фазу будет равна одной трети доли периода основной частоты. Изложенное можно изобразить графически на рис. 163.

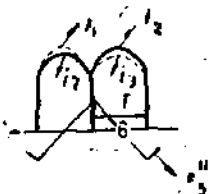


Рис. 163. Ток анода выпрямителя при разделении фаз дросселем Кюблера.

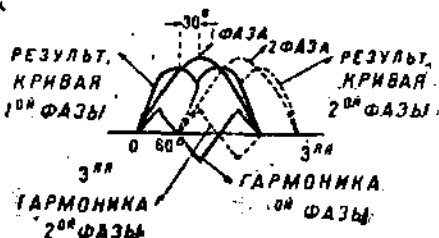


Рис. 164. Влияние напряжения третьей гармоники дросселя Кюблера на форму выпрямленного напряжения.

Таким образом на кривую выпрямленного напряжения будет влиять э. д. с. 3-й гармоники, возникающая вследствие применения разделительного дросселя. Важно отметить, что третья гармоника будет иметь место в напряжении каждой из фаз трансформатора, причем ее фазный сдвиг по отношению к основной волне равен нулю градусов.

Графически влияние третьей гармоники разделительного дросселя на форму кривой выпрямленного напряжения представлено на рис. 164. Здесь сплошным

линиями обозначена первая фаза и пунктиром вторая фаза, сдвинутая относительно первой на 60° . Как видно из рисунка, выпрямленное напряжение по форме остается тем же самым, только несколько уменьшается его амплитуда, причем последняя сдвигается на 30° относительно своего первоначального положения.

Для определения соотношений токов и напряжений отдельных частей схемы введем следующие обозначения: $e_1 = E_m \sin \omega t$ и i_1 — соответственно мгновенные значения напряжения и тока первой фазы вторичной обмотки трансформатора, $e_2 = E_m \sin(\omega t - 60^\circ)$ и i_2 — то же для 2-й фазы, R — омическое сопротивление цепи постоянного тока, L — коэффициент самоиндукции одной из обмоток разделительного дросселя.

Для промежутка времени, когда ток проходит одновременно по 1-й и 2-й фазам выпрямителя, можно написать следующие дифференциальные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} e_1 - (i_1 + i_2)R - L \frac{di_1}{dt} + L \frac{di_2}{dt} &= 0 \\ e_2 - (i_1 + i_2)R - L \frac{di_2}{dt} + L \frac{di_1}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (192)$$

Сложив эти два уравнения, получим мгновенное значение суммы токов $i_1 + i_2$, или, что то же, мгновенное значение выпрямленного тока:

$$i_1 + i_2 = i = \frac{e_1 + e_2}{2R} = \frac{\sqrt{3}}{2R} E_m \sin(\omega t - 30^\circ). \quad (193)$$

Мгновенное значение напряжения со стороны выпрямленного тока:

$$V_g = \frac{e_1 + e_2}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \sin(\omega t - 30^\circ). \quad (194)$$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения (при $m=6$):

$$V_g = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + 30^\circ}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} + 30^\circ} \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \sin(\omega t - 30^\circ) dt = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} E_m = \frac{3\sqrt{3}}{\sqrt{2} \cdot \pi} E = 0,855 E.$$

Таким образом соотношение V_g/E такое же, как у трехфазной схемы.

Форма кривой анодного тока, как это ясно из рис. 162, представляет собой два участка формы тока при шестифазном выпрямлении, почему эффективное его значение больше такового же при нормальном шестифазной схеме в $\sqrt{2}$ раз. Кроме того, так как каждое мгновение работают два анода, пропускающие одинаковые токи, то амплитуда анодного тока будет в 2 раза меньше таковой же при нормальном выпрямлении.

Поэтому:

$$\frac{I_{2\text{эф}}}{I_g} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{6} \times 2} = 0,289$$

Коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора:

$$k_2 = \frac{I_2 V_2}{I_{2\phi} E m} = \frac{I_2 V_2}{0,289 I_2 0,855 V_2 6} \cong 0,67,$$

или обратная величина $k'' = 1,49$.

Переходим к коэффициенту использования первичной обмотки.

Форма кривой первичного тока дана на рис. 162. Эффективное значение первичного тока будет в $\sqrt{2}$ раз больше такового же для анодного тока.

Таким образом:

$$I_{1\phi} = \sqrt{2} I_{2\phi} = \sqrt{2} \times 0,289 I_2 = 0,41 I_2$$

и коэффициент использования первичной обмотки:

$$k_1 = \frac{I_2 V_2}{I_{1\phi} E m} = \frac{I_2 V_2}{0,41 I_2 0,855 V_2 3} = 0,955$$

или обратная величина $k'' = 1,05$. Линейный ток равен току первичной обмотки.

Типовая мощность трансформатора:

$$k_T = \frac{1,49 + 1,05}{2} = 1,27;$$

фактор искажения:

$$\mu = \frac{I_2 V_2}{I_1 E m} \times \frac{\frac{1}{2} + \frac{m}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{m}}{\frac{m^2}{\pi^2} \sin^2 \frac{\pi}{m}} = 0,96.$$

2. Нормальная шестифазная схема звезда-звезда.

При включении обмоток трансформатора по схеме звезда-шестифазная звезда могут быть два различных режима его работы на выпрямитель. Остановимся на физической стороне вопроса.

Из рассмотрения магнитного состояния трансформатора при работе его на выпрямитель по вышеуказанной схеме следует (см. стр. 237), что в сердечниках его развивается добавочный поток намагничивания переменного направления с частотой, отвечающей 3-й гармонике основной частоты сети.

Рассмотрим два случая работы трансформатора: первый, когда вторичная нагрузка очень мала, и второй, когда он нагружен полностью.

В первом случае магнитная проводимость для добавочного потока рассеяния невелика, и нагрузочные соотношения токов и напряжений для вторичной обмотки могут быть взяты по нормальному шестифазному включению, аналогично случаю включения первичной обмотки трансформатора треугольником, форма же кривой первичного тока будет несколько разниться из-за наличия тока, создающего добавочный поток рассеяния.

На рис. 165.4 даны формы кривых токов для данного случая.

При нагрузке выпрямителя добавочный поток рассеяния увеличивается и может достичь величины, достаточной для создания добавочной э. д. с., способной вызвать прохождение тока сразу по двум анодам выпрямителя, подобно

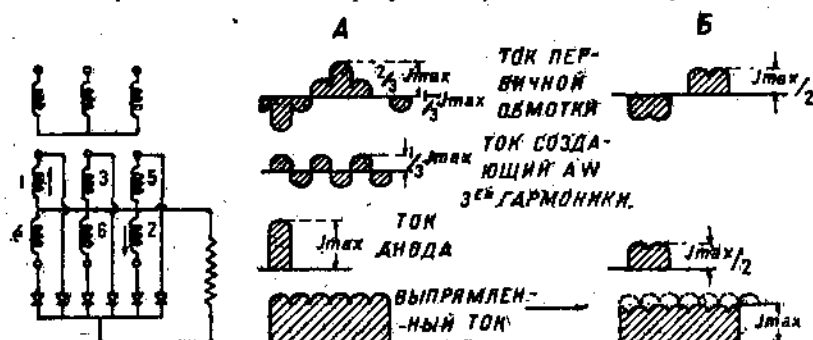


Рис. 165. Схема включения трехфазная звезда - шестифазная звезда для трансформатора, работающего на выпрямитель, и формы токов обмоток трансформатора.

схеме с разделительным дросселем. Поэтому и все соотношения в токах и напряжениях будут идентичны с таковыми же при выпрямлении по шестифазной схеме с разделительным дросселем. Формы кривых токов для этого случая даны на рис. 165 Б.

3. Каскадная шестифазная схема.

Каскадная шестифазная схема, как это видно из рис. 166, заключает в себе последовательное включение выпрямителей, что важно при получении высоких напряжений. Вторичная обмотка трансформатора в разбираемом случае представляет собою две трехфазных звезды, сдвинутых друг относительно друга на 180° . Каждая из звезд при самостоятельной работе дает напряжения формы, представленной на рис. 167А. При последовательном включении эти напряжения должны сложиться. Так как они сдвинуты по фазе, амплитуда результирующего напряжения не равна удвоенной амплитуде фазного напряжения каждой звезды, но только

в $\sqrt{3}$ раз больше. По форме результирующее напряжение будет соответствовать нормальному шестифазному выпрямлению. Поэтому:

$$V_g = 0,955 E'_{\pi} = 0,955 E_{\pi} \sqrt{3} = 1,64 \sqrt{3} E = 2,33 E$$

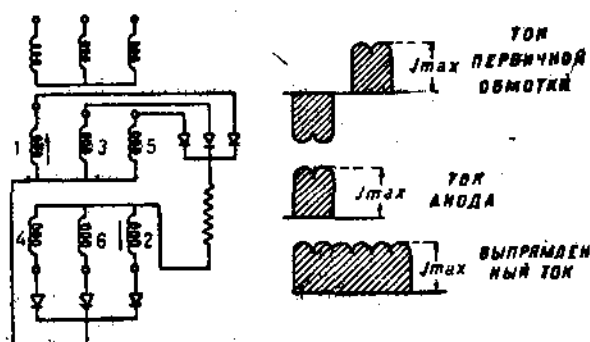


Рис. 166. Каскадная шестифазная схема включения трансформатора (трехфазная звезда - две трехфазных звезды, взаимно сдвинутых на 180°), работающего на выпрямитель, и формы токов обмоток трансформатора.

или

$$\frac{E}{V_g} = 0,43.$$

Проследим механизм прохождения тока по схеме. Если бы работала только одна из вторичных звезд, то форма тока анода выпрямителя соответствовала бы нормальной трехфазной схеме (см. штрих на рис. 167А). При каскадном включении ток первого каскада должен пройти и по второму каскаду, в котором также находится электрический вентиль. Прохождение его может быть обеспечено лишь в том случае, если один или несколько анодов выпрямителя второго каскада имеют по отношению к своему катоду или положительные или нулевые потенциалы. В случае наличия нескольких положительных потенциалов на анодах второго каскада ток первого каскада пойдет по фазе второго каскада, обладающей наибольшим положительным потенциалом. Как это видно из рис. 167 Б, ток первой фазы первого каскада в течение времени t должен проходить по 6-й фазе второго каскада, а в течение времени t' по 2-й фазе его. В свою очередь при прохождении тока первой фазы первого каскада

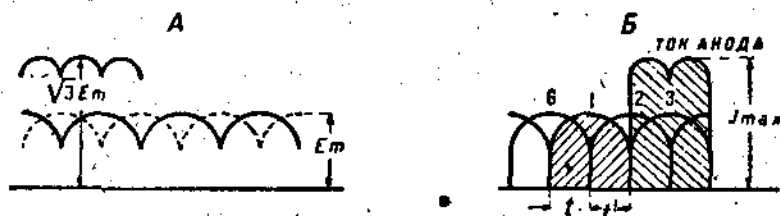


Рис. 167. Сложение напряжений и токов при каскадной схеме по рис. 166.

за время t — 6-я фаза, а за время t' — 2-я фаза второго каскада посылают свой собственный ток. Таким образом мгновенное значение результирующего тока, проходящего по каждому аноду, будет представлять собою сумму мгновенных значений токов двух фаз.

Графически весьма легко построить форму кривой результирующего тока, что и сделано на рис. 167Б. Как видно, она представляет собою совокупность следующих друг за другом двух анодных токов, по форме идентичных с шестифазным выпрямлением. Так как в последнем случае

$$\frac{I_{2\phi}}{I_g} = \frac{1}{\sqrt{6}},$$

то это же соотношение для разбираемого случая будет:

$$\frac{I_{2\phi}}{I_g} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{6}} = \frac{1}{\sqrt{3}},$$

т. е. соответствует трехфазному выпрямлению.

Коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора:

$$k_2 = \frac{I_g V_g}{0,58 I_g 0,43 V_g 6} = 0,67$$

или обратная величина $k_2'' = 1,49$.

Форма кривой первичного тока будет такую же, как при включении по

схеме с разделительным дросселем, почему все остальные соотношения в каскадной схеме будут соответствовать схеме с разделительным дросселем. Так например:

$$k_1 = \frac{I_g V_g}{0,58 \sqrt{2} I_g 0,43 V_g 3} = 0,955 \text{ и т. д.}$$

4. Шестифазное выпрямление по схеме Грэца.

Все схемы Грэца по существу каскадные схемы, так как выпрямленный ток идет всегда по двум анодам выпрямителя, включенным последовательно. Отличительной чертой этих схем является почти полное использование трансформатора.

На рис. 168 даны принципиальные схемы включения для однофазного и трехфазного трансформаторов, причем в первом случае выпрямляются обе

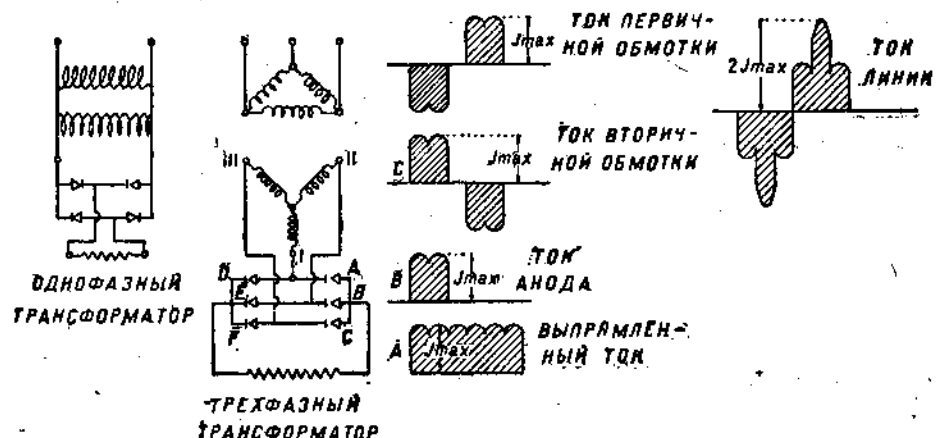


Рис. 168. Схема включения обмоток одно- и трехфазного трансформаторов по Грэцу в выпрямительную схему (во втором случае — шестифазного выпрямления) и формы токов обмоток трехфазного трансформатора.

полуволны переменного тока, а во втором выпрямление является эквивалентным шестифазному. Найдем интересные нас соотношения для токов и напряжений отдельных частей схемы в случае трехфазного трансформатора при условии включения его вторичной обмотки звездой.

Совершенно очевидно, что выпрямленное напряжение будет иметь шести-фазные пульсации, так как при выпрямлении используются обе полуволны напряжения трансформатора. В отличие от предыдущих схем за амплитуду выпрямленного напряжения в настоящем случае приходится принимать не амплитуду напряжения фазы, а амплитуду напряжения линии.

При этом условии аналогично предыдущим примерам:

$$V_g = 0,955 E_{max} \sqrt{3} = 1,64 E \sqrt{2} = 2,33 E,$$

где E — эффективное напряжение фазы трансформатора.

Проследим далее механизм прохождения тока через анод и через вторичную обмотку трансформатора. Пусть в некоторый момент времени положительный потенциал будет иметь точка 1 рис. 168. Ток пойдет через анод D_1 .

сопротивление нагрузки R , анод B к точке II . Так как потенциал точки I за период основной частоты будет иметь два промежутка времени, когда будет существовать положительный потенциал как от сопряженного напряжения $I - II$, так и от сопряженного напряжения $III - I$, то и ток по анодам D и B будет за период проходить два раза. Точно то же самое можно сказать и по отношению к другим анодам.

Далее в виду того, что выпрямленное напряжение имеет нормальные шестифазные пульсации, то и анодный ток должен представлять собою два импульса по продолжительности и форме идентичных с анодным током нормальной шестифазной схемы. Форма кривой анодного тока дана на рис. 168, эскиз B .

Такова же была бы и форма кривой тока вторичной обмотки, если бы выпрямлялась лишь одна полуволна переменного тока. Фактически, так как выпрямляются две полуволны, то и ток вторичной обмотки примет форму, данную на рис. 168, эскиз C .

Найдем эффективное значение тока анода, обозначив его через $I_{a\text{эф}}$; так как он отличается от тока вторичной обмотки:

$$I_{a\text{эф}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{6}} I_g = 0,56 I_g.$$

Точно так же:

$$I_{2\text{эф}} = \frac{2}{\sqrt{6}} I_g = 0,817 I_g.$$

коэффициент использования вторичной обмотки

$$k_2 = \frac{I_g V_g}{I_{2\text{эф}} E_m} = \frac{I_g V_g}{0,817 I_g 0,43 V_g 3} = 0,955$$

или обратная величина $k'' = 1,05$.

Так как ток вторичной обмотки в разбираемом случае является током переменным, то и первичная обмотка трансформатора в случае включения ее звездой будет загружена током идентичной формы, а следовательно, и коэффициент использования его будет тем же самым.

Типовая мощность трансформатора:

$$k_T = \frac{1,05 + 1,05}{2} = 1,05.$$

Фактор искажения:

$$\mu = 0,96.$$

Б. Шестифазное выпрямление по схеме треугольник-звезда с двойным энгагом.

Схема включения дана на рис. 169, так же как и векторная диаграмма для вторичной обмотки. Соотношение в напряжениях и токах для вторичной обмотки трансформатора легко получить, если приведенную выше схему заменить в электрическом отношении ей эквивалентной, т. е. полагать, что на трансформаторе намотаны обмотки, как на нормальном шестифазном. В этом случае за фазное напряжение придется принять напряжение, соответствующее вектору $a_1 I$, обозначенному на рисунке пунктиром.

При этом все соотношения в токах и напряжениях будут такими же, как в схеме нормального шестифазного выпрямления, т. е.

$$I_{2\phi} = 0,41 I_g; E = 0,74 V_g; k'' = 1,81.$$

Если теперь перейти к реальной схеме, то нужно отметить следующие обстоятельства. Так как обмотка, э. д. с. которой соответствует вектору AO на рис. 169, является как бы общей для обмоток $A1$ и $A2$, то и ток в ней по форме и эффективному значению должен отличаться от тока в этих обмотках. Действительно, если обмотка $A1$ пропускает ток в течение одной шестой доли периода, так же как и обмотка $A2$, то обмотка AO должна за период пропустить ток их обеих, т. е. она будет загружена током уже в течение трети периода. Форма кривой тока в ней должна соответствовать совокупности двух импульсов тока обмотки $A2$ (рис. 170).

Таким образом если в обмотке $A1$ $I_{2\phi} = 0,41 I_g$, то в обмотке AO $I'_{2\phi} = 0,41 \sqrt{2} I = 0,58 I_g$. Определим, какова получается выгода в затрате меди на обмотку для разбираемого случая по сравнению с нормальной шестифазной звездой, если не обращать внимания на напряжение, а расчеты производить только по току. Для этого примем, что все обмотки AO , $A1$, $A2$ и т. д. имеют по равнью количеству витков и плотность тока в каждой обмотке одна и та же. Для веса меди всех обмоток разбираемого включения получим:

$$P_1 = \frac{0,41 l w 6}{\Delta} + \frac{0,58 l w 3}{\Delta} = \frac{l w}{\Delta} 4,2,$$

где P_1 — вес меди всех вторичных обмоток, l — средняя длина витка, w — число витков и Δ — плотность тока.

Если бы включение было произведено по нормальной шестифазной звезде, то нам пришлось бы уложить элементарных обмоток уже не девять, как в настоящем случае, а двенадцать. В этом случае вес меди:

$$P_2 = \frac{l w}{\Delta} 0,41 \times 12 = 4,9.$$

Отношение:

$$\frac{P_1}{P_2} = 0,86.$$

Таким образом, если не принимать во внимание напряжения, то, включая трансформатор по схеме с двойным зигзагом, мы получили бы меди на 14% меньше, чем при нормальном шестифазном включении. В действительности выгода эта целиком компенсируется именно применением зигзага, при котором фазное напряжение, благодаря сдвигу фаз, будет меньше, чем при нормальном шестифазном включении, что ясно из векторной диаграммы рис. 169. Действительно в схеме с двойным зигзагом оно равно геометрической сумме двух векторов, сдвинутых друг относительно друга на 120° , а в нормальной шести-

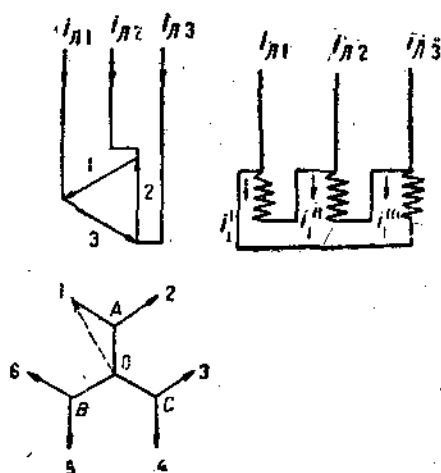


Рис. 169. Схема включения трансформатора треугольник-звезда с двойным зигзагом, работающего на выпрямитель, и векторная диаграмма напряжений во вторичной обмотке.

фазной схеме их алгебраической сумме. При равных значениях фазного напряжения отношения весов меди выразятся следующим уравнением:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2 OA \cos 30^\circ}{2 OA} = 0,86,$$

т. е. для получения одинакового фазного напряжения при зигзаге меди должно быть затрачено на 14% больше.

Из вышеизложенного очевидно, что использование вторичной обмотки трансформатора, включенного по схеме с двойным зигзагом, совершенно такое же, как и у соединенного по нормальной шестифазной схеме.

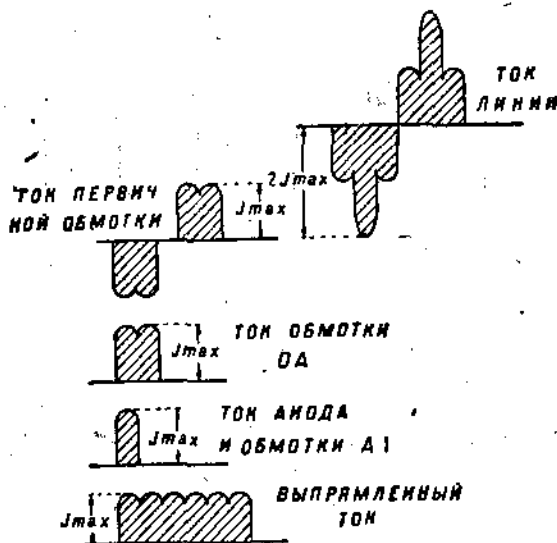


Рис. 170. Формы кривых токов обмоток трансформатора при включении его по рис. 169.

Переходим к первичной обмотке. Форма кривой тока первичной обмотки дана на рис. 170. Как это нетрудно сообразить, он будет идентичен с формой кривой тока в средней звезде вторичной обмотки. Именно этим и отличается разбираемая схема от нормальной шестифазной схемы треугольник - шестифазная звезда в смысле использования первичной обмотки.

Мы условились, что коэффициент трансформации по фазным напряжениям равен единице. В разбираемом случае при равенстве числа витков первичной обмотки числу витков обмотки АО, благодаря зигзагу, коэффициент трансформации будет равен $\sqrt{3}$; поэтому

$$I_{1\phi} = \sqrt{2} I_{2\phi} = 0,817 I_g$$

$$E = \frac{0,74}{\sqrt{3}} V_g$$

и коэффициент использования первичной обмотки

$$k_1 = \frac{I_g V_g}{E I_{1\phi} m} = \frac{I_g V_g \sqrt{3}}{0,74 V_g 0,827 I_g 3} = 0,955,$$

или обратная величина $k' = 1,05$. Типовая мощность трансформатора

$$K' T = \frac{1,05 + 1,81}{2} = 1,43$$

Линейный ток будет представлять собою сумму токов, по форме идентичных току первичной обмотки, но сдвинутых по фазе на 60° . Форма его дана на рис. 170.

Фактор искажения:

$$\mu = 0,96.$$

Весь материал по соотношениям между токами и напряжениями в выпрямительной установке сведен в таблицу 43.

ТАБЛИЦА 43.

Схема включения	Вторичная обмотка трансформатора				Первичная обмотка трансформатора			Весь трансформатор		Линия			Перемен. состав, выпрям. напряжения	
	Эффективное фазное напряжение E при $V_g = 1$.	Эффективный фазный ток I_g эф при выпрямленном токе $I_g = 1$.	Мощность вторичной обмотки трансформат. при $V_g I_g = 1$, или коэффициент k_g' .	Коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора k_g .	Эффективный фазный ток I_1 эф. при выпрямленном токе $I_g = 1$.	Мощность первич. обмотки трансф. при $I_g V_g = 1$ или коэфф. увелич. мощн. k_1 .	Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора k_1 .	Иная мощность или коэфф. увеличения мощности трансформатора k_T .	Коэффициент использования трансформатора k_T .	Эффективное значение линейного тока I_Δ .	V/Δ линии при мощности выпр. тока $V_g I_g = 1$.	Фактор искажения μ .	Частота наибольшей гармоник при частоте сети $f = 50$ пер./сек.	Амплитуда наибольшей гармоник при $V_g = 1$.
	1,11	0,785	1,74	0,575	0,555	1,23	0,815	1,48	0,675	0,555	1,11	0,9	100	0,67
	0,855	0,58	1,49	0,67	0,47	1,21	0,825	1,35	0,74	0,47	1,21	0,825	150	0,25
	0,855	0,58	1,49	0,67	0,47	1,21	0,825	1,35	0,74	0,82	1,21	0,825	150	0,25
	0,74	0,41	1,81	0,55	0,82	1,05	0,955	1,43	0,70	0,82	1,05	0,96	800	0,057
	0,855	0,289	1,49	0,67	0,31	1,05	0,955	1,27	0,79	0,41	1,05	0,96	300	0,057
	0,74	0,41	1,81	0,55	0,58	1,28	0,78	1,55	0,65	0,82	1,05	0,96	300	0,057
	0,43	0,58	1,49	0,67	0,82	1,05	0,955	1,27	0,79	0,82	1,05	0,96	300	0,057
	0,43	0,58	1,49	0,67	0,82	1,05	0,955	1,27	0,79	1,42	1,05	0,96	300	0,057
	0,855	0,289	1,49	0,67	0,41	1,05	0,955	1,27	0,79	0,41	1,05	0,96	300	0,057
	0,855	0,289	1,49	0,67	0,41	1,05	0,955	1,27	0,79	1,71	1,05	0,96	300	0,057
	0,43	0,41 0,58	1,81	0,55	0,82	1,05	0,955	1,43	0,7	0,82	1,05	0,96	300	0,057
	0,43	0,41 0,58	1,81	0,55	0,82	1,05	0,955	1,43	0,7	1,42	1,05	0,96	300	0,057
	0,43	0,82	1,05	0,955	0,82	1,05	0,955	1,05	0,955	1,42	1,05	0,96	300	0,057
	0,74	0,47	1,05	0,955	0,82	1,05	0,955	1,05	0,955	0,82	1,05	0,95	300	0,057

РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА С ВЫПРЯМИТЕЛЕМ.

1. Магнитная цепь трансформатора при работе его на выпрямитель.

Одной из основных особенностей работы трансформатора на выпрямитель, если он включен по одной из нормальных схем, является наличие добавочных потоков утечки, возникающих в связи с наличием во вторичной обмотке его постоянной составляющей тока.

Появляющиеся в сердечнике трансформатора при выпрямлении тока добавочные магнитодвижущие силы утечки в зависимости от схемы включения имеют весьма различные значения, и влияние их на работу трансформатора также весьма разнообразно.

При всех дальнейших рассуждениях будем руководствоваться следующими основными положениями.

1. Падение в колбе постоянно, т. е. не имеет характера падения напряжения на омическом сопротивлении, почему ток одновременно может идти по нескольким анодам только тогда, когда суммы электродвижущих сил в цепи каждого анода равны.

2. В первичной обмотке трансформатора идет лишь чисто переменный ток.

3. При разветвлении токов, что имеет место в случае многофазного трансформатора, сумма токов для каждого мгновения равна нулю.

4. Магнитносвязанные между собою стержни многофазного трансформатора должны находиться в магнитном равновесии, т. е. суммы ампервитков каждого стержня должны быть равны между собою.

Кроме того принимаем коэффициент трансформации по фазе равным единице и пренебрегаем намагничивающим током.

2. Поток утечки в однофазном трансформаторе с двухсторонним выпрямлением.

Рассмотрим работу магнитной цепи однофазного трансформатора при работе его на выпрямитель с использованием обоих полупериодов переменного напряжения.

Пусть в некоторый момент времени выпрямленный ток i проходит по аноду I выпрямителя (рис. 171). Так как коэффициент трансформации по фазе нами принят за единицу (рис. 171: $w = w' = w''$), то первичный ток должен быть равным i_1 .

Аналитически это можно выразить следующим образом. Так как в точке A первичные токи разветвляются, то

$$i_1' + i_1'' = 0,$$

а согласно пункту 4 основных положений

$$i_1' w + i w = i_1'' w. \quad (195)$$

Из этих уравнений легко определить:

$$i_1'' = -i_1' = \frac{1}{2} i, \quad (196)$$

точно так же, как и:

$$i - i_1' = \frac{1}{2} i.$$

Таким образом kern I трансформатора будет намагничиваться магнитодвижущей силой, равной $\frac{1}{2} i w$, так же как и kern II. Обе эти магнитодвижущие силы (рис. 171) будут направлены в одну и ту же сторону, что создаст поток утечки, замыкающийся от одного ярма трансформатора к другому через воздух.

Этот добавочный поток утечки в рассматриваемом случае будет иметь форму, аналогичную форме выпрямленного тока, т. е. будет пульсирующим. Выказанное положение станет совершенно ясным из рассмотрения кривых токов первичной и вторичной обмоток (рис. 158 на стр. 217).

Как видно из приведенного выше уравнения магнитодвижущих сил, написанного для какого-то мгновенного значения тока, поток утечки создается каждое мгновение магнитодвижущей силой, равной разности между ампервитками первичной и вторичной цепи одного ярма. Так как кривые токов в обеих обмотках трансформатора в течение полупериода идентичны и отличаются только амплитудами, то и разность между их мгновенными значениями будет меняться по кривой той же формы.

Пульсирующий поток утечки кроме добавочного намагничивания стержней будет индуцировать в обмотках трансформатора электродвижущие силы двойной частоты, уменьшающие пульсации выпрямленного тока, т. е. будет частично выполнять функции катодного дросселя.

Пульсации потока утечки можно уничтожить, применяя схему параллельного включения первичных обмоток трансформатора, как это указано на рис. 172. В этом случае каждая из первичных обмоток будет работать совершенно самостоятельно, и первичный ток в ней по форме будет таким же, как и вторичный, но нулевая линия будет сдвинута на величину постоянной составляющей последнего (рис. 157 на стр. 216). Здесь поток утечки будет создаваться, как и раньше, разностью ампервитков по керну, которая, как это не трудно видеть, будет равна постоянной составляющей выпрямленного тока. Таким образом при параллельном включении первичных обмоток трансформатора поток утечки не будет пульсировать, создавая в стержнях постоянное намагничивание.

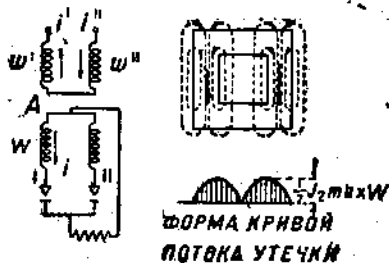


Рис. 171. Поток утечки в магнитной цепи однофазного трансформатора, работающего на двухпериодный выпрямитель, и схема включения трансформатора.

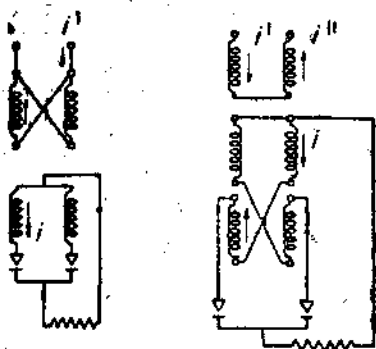


Рис. 172. Схема параллельного включения первичных обмоток однофазного трансформатора, работающего на выпрямитель.

Рис. 173. Схема заград-включения вторичной обмотки однофазного трансформатора, работающего на выпрямитель.

Рис. 173. Схема заград-включения вторичной обмотки однофазного трансформатора, работающего на выпрямитель.

Величина магнитодвижущей силы утечки будет составлять 31,8% от амплитуды вторичных ампервитков.

Для полного уничтожения добавочного потока утечки употребляется включение вторичной обмотки трансформатора зигзагом, как это указано на рис. 173.

В данном случае работа магнитной цепи трансформатора ничем не отличается от нормальных условий в цепи переменного тока, так как одним и тем же анодным током намагничиваются сразу два стержня трансформатора, и ампервитки каждого стержня целиком компенсируются первичными ампервитками.

8. Поток утечки в трехфазном стержневом трансформаторе.

а. Соединение звезда-звезда. При определении формы кривой первичного тока для данной схемы соединения ранее было установлено, что в каждый момент времени сумма ампервитков по каждому керну трансформатора равна одной трети ампервитков вторичной обмотки. Нетрудно также уяснить себе, что во всех трех стержнях направление потоков, создаваемых этими ампервитками, будет в одну и ту же сторону. Это обстоятельство обеспечивает наличие потока утечки, замыкающегося через воздух от яра к яру (рис. 174).

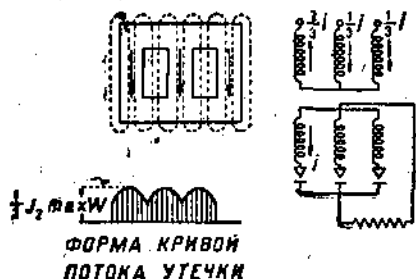


Рис. 174. Поток утечки в магнитной цепи трехфазного трансформатора, включенного по схеме звезда-звезда и работающего на выпрямитель, и схема включения трансформатора.

Благодаря своим пульсациям он действует сглаживающе на форму кривой выпрямленного тока, индуктируя в обмотках трансформатора электродвижущие силы третьей гармоник.

Как имеющий постоянное направление, поток этот не оказывает влияния на сдвиг по фазе токов, поступающих из сети.

Вредное влияние потока утечки сказывается в насыщении магнитных стержней и в увеличении рассеяния трансформатора.

б. Соединение треугольник-звезда. При соединении первичной обмотки трансформатора треугольником, как это было установлено ранее (рис. 159 стр. 118), электрическая связь между обмотками нарушается, и каждая фаза работает самостоятельно, а форма кривой тока первичной обмотки идентична таковой же для тока вторичной обмотки, но с нулевой линией, сдвинутой на величину постоянной составляющей тока анода. Поэтому в каждое мгновенное разность между ампервитками фазы вторичной обмотки и ампервитками той же фазы первичной обмотки будет равна постоянной составляющей от I_{20} .

Для соблюдения условия магнитного равновесия трансформатора каждый из двух других кернов его должен быть намагничен теми же разностными

ампервиткамн. Как было установлено прежде (формула 162 на стр. 213), постоянная составляющая тока анода при трехфазном выпрямлении равна:

$$I_g = I_{\max} \frac{\sqrt{3}}{2\pi} = 0,28 I_{\max}.$$

Таким образом в разбираемом случае все три стержня трансформатора оказываются намагниченными в одном направлении магнитодвижущей силой, равной 0,28 от амплитуды ампервитков вторичной обмотки. Возникающий поток утечки в отличие от предыдущего случая не будет пульсировать, создавая лишь добавочное намагничение стержней и увеличивая рассеяние трансформатора.

с. *Соединения вторичной обмотки зигзагом, первичной обмотки звездой или треугольником.* Для уничтожения потока утечки в трехфазном трансформаторе можно вторичную его обмотку включить зигзагом, как это указано на рис. 175. В этом случае, опираясь на основные положения, данные выше, при равенстве витков в каждой из обмоток трансформатора, можно написать:

$$\left. \begin{aligned} i_1' + i_1'' + i_1''' &= 0 \\ i_1' + i_1'' &= i_1''' + i_1''' = i_1''' \\ i_1'' &= -i_1' \end{aligned} \right\}, \quad (197-198)$$

откуда

$$i_1'' = i_1' \text{ и } i_1' = -i_1', \quad (199)$$

т. е.

$$i_1''' = 0 \quad (200)$$

Следовательно ампервитки уравновешены на каждом керне.

Недостатком данной схемы включения является увеличение (из-за зигзага) количества меди вторичной обмотки.

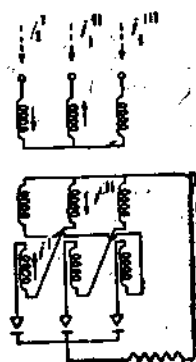


Рис. 175. Схема зигзаг-включения вторичных обмоток трехфазного трансформатора, работающего на выпрямитель.

4. Поток утечки в шестифазном стержневом трансформаторе.

в. *Соединение звезда-звезда.* Совершенно иначе обстоит дело с потоком утечки при включении трансформатора по разбираемой схеме. В то время как в трехфазном трансформаторе при чередовании прохождения тока по анодам выпрямителя направление магнитодвижущей силы вторичной обмотки имеет одно и то же направление, в шестифазном трансформаторе при перерыве тока одной фазы и переходе его на другую магнитодвижущая сила вторичной обмотки изменяет свое направление на обратное, так как витки вторичной обмотки расположены симметрично по обе стороны от нулевой точки.

Вышесказанное совершенно очевидно из рассмотрения рис. 156 на стр. 215.

Так как прохождение тока по аноду продолжается в течение $\frac{1}{6}$ доли периода, то частота изменения магнитодвижущей силы будет тройной по отношению к частоте сетн. Далее, в виду того, что при прохождении тока по какому-нибудь одному аноду в магнитном отношении рассматриваемая система ничем не отличается для данного мгновения от рассмотренной выше трехфазной системы, то в стержнях трансформатора будет иметь место добавочный поток намагничивания с амплитудой, равной одной трети от амплитуды потока, создаваемого вторичной обмоткой. В отличие от трехфазной системы поток

этот будет не пульсирующим, а чисто переменным (рис. 176). Действие добавочного потока рассеяния на режим работы трансформатора скажется в том, что подобно разделительному дросселю он будет индутировать в обмотках трансформатора добавочные э.д.с., стремящиеся выравнять потенциалы двух соседних по фазам анодов, а следовательно и обеспечит одновременное прохождение по ним тока.

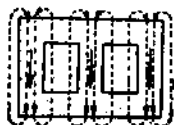


Рис. 176. Поток утечки в магнитной цепи шестифазного трансформатора, работающего на выпрямитель, при включении его обмоток по схеме звезда-звезда.

В этом случае между анодами пойдет ток короткого замыкания $i_{k \max}$, равный $i_{k \max} = i_b - i_c$. Этот ток намагнитит оба стержня трансформатора в одном направлении и потребует для компенсации себя из сети добавочных токов i_a, i_b, i_c . Применяя основные положения к рассматриваемому случаю, можем написать:

$$\left. \begin{aligned} i_a + i_b + i_c &= 0 \\ i_a + i_{k \max} &= i_{k \max} + i_b = i_c \end{aligned} \right\} \quad (201)$$

откуда:

$$i_c = \frac{2}{3} i_{k \max}$$

и

$$i_a = i_b = -\frac{1}{3} i_{k \max} \quad (202)$$

Таким образом добавочное намагничение сердечников трансформатора в рассматриваемом случае одновременного пропуска тока двумя анодами будет значительно меньше, нежели в случае прохождения тока только по одному аноду, так как $i_{k \max} > i_b$.

Всю работу трансформатора можно себе представить следующим образом.

При малых значениях нагрузки ток в каждое мгновение проходит только по одному аноду выпрямителя. В стержнях трансформатора развивается добавочный поток намагничивания переменного направления, пропорциональный одной трети тока вторичной обмотки и имеющий тройную частоту по отношению к частоте сети. Этот поток при увеличении нагрузки в состоянии сдвигивать в обмотках трансформатора достаточной величины э. д. с., выравнивающие потенциалы анодов соседних фаз, следствием чего является одновременное прохождение тока по двум анодам. При этом самый до-

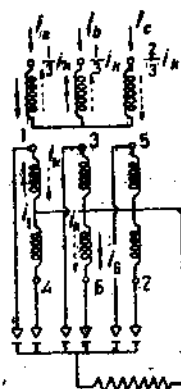


Рис. 177. Распределение токов в обмотках шестифазного трансформатора, включенного по схеме трехфазная звезда-шестифазная звезда, при полной нагрузке его на выпрямитель.

добавочный поток, возрастая по абсолютной величине, в процентном отношении к току вторичной обмотки уменьшается. Теоретически при полном выравнивании напряжений двух следующих друг за другом фаз и следовательно при абсолютном равенстве анодных токов, этот добавочный поток сводится к нулю.

Все вышесказанное является причиной большого падения выпрямленного напряжения, почему разбираемая схема мало употребительна.

б. Соединение треугольник-звезда. При включении первичной обмотки шестифазного трансформатора треугольником, как это не трудно видеть из рассмотрения формы кривой тока первичной и вторичной обмоток, в каждый момент все стержни трансформатора оказываются уравновешенными без добавочного потока намагничивания (рис. 161 на стр. 227). Действительно при прохождении тока по аноду 1-й фазы в соответствующую фазу первичной обмотки на сети подается ток реакции точно такой же формы и продолжительности, как во вторичной обмотке.

Таким образом по керну работающей фазы вторичные ампервитки целиком будут скомпенсированы первичными ампервитками и никакого добавочного намагничивания двух остальных стержней для поддержания магнитного равновесия трансформатора не потребуется.

Если не считаться с плохим коэффициентом использования вторичной обмотки, то эта схема включения является наиболее благоприятной.

Как и во всех предыдущих случаях для полной компенсации добавочного потока намагничивания шестифазного трансформатора вторичная обмотка его может быть включена зигзагом, что, понятно, вызовет добавочный расход меди.

5. Поток утечки в трансформаторе при специальных схемах включения.

а. Включение по схеме с разделительным дросселем. Качественно картина работы магнитной цепи эквивалентна схеме включения звезда-шестифазная звезда, количественно же здесь получается значительная разница, так как разделительный дроссель работает значительно интенсивнее в смысле выделения третьей гармоники, нежели трансформатор, предоставленный сам себе.

б. Каскадное включение. При каскаде в каждое мгновенное одновременно пропускают ток две соседние фазы вторичной обмотки трансформатора. Так как эти обмотки расположены на двух разных кернах, то получается как бы зигзаг-включение, почему вторичные ампервитки каждого стержня целиком скомпенсированы первичными ампервитками без добавочных потоков намагничивания.

с. Схемы Греча, как несущие во вторичных своих обмотках чисто переменный ток, в добавочных потоках намагничивания стержней не нуждаются.

д. Включение вторичной обмотки трансформатора двойным зигзагом компенсирует целиком ампервитки первичной и вторичной обмоток по отдельным стержням, почему добавочных потоков намагничивания не получается.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

ВЫПРЯМИТЕЛЬ С РЕАКТИВНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ, СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ В АНОДНЫХ ЦЕПЯХ.

1. Принятые упрощения. Бесконечно большая реактивная катушка в катоде.

В главе первой были рассмотрены соотношения между токами и напряжениями *нереальной* ртутно-выпрямительной установки, так как не были приняты во внимание ни потери, ни наличие реактивных сопротивлений в сети пере-

менного тока и в трансформаторе. Полученные соотношения дают возможность в первом приближении произвести расчет анодного трансформатора и других элементов установки. Поставим себе ближайшей задачей выяснить, как влияют все факторы, которыми мы перед этим пренебрегали, на работу ртутного выпрямителя, т. е. на форму токов и их эффективные значения, на рабочую характеристику выпрямителя, мощность трансформатора и т. д. При этом, для упрощения рассуждений и выводов, мы допустим существование реактивных сопротивлений только в цепи вторичных обмоток трансформатора, что может быть следствием рассеяния в этих обмотках и наличия реактивных катушек в цепи анодов.

Падениями напряжения в первичных обмотках трансформатора, в линии передачи и в дуге мы попрежнему будем пренебрегать. Наконец сделаем еще одно важное допущение, а именно, что выпрямленный ток не имеет пульсаций.

Конечно, совершенной прямолинейной формы выпрямленного тока можно достигнуть, поместив в его цепь бесконечно большую реактивную катушку, чего на практике сделать нельзя. Однако последнее допущение оправдывается тем соображением, что оно очень упрощает и облегчает выводы и вместе с тем не вносит существенных неточностей в результаты, даже при чисто безындукционной нагрузке многофазного выпрямителя. Если же выпрямитель работает на тяговую или моторную заводскую нагрузку, то в этом случае вносится индуктивность, сглаживающая в достаточной степени выпрямленный ток.

2. Переход дуги с анода на анод.

Переходим к изучению влияния реакции вторичных обмоток трансформатора, при этом рассмотрим самый общий случай m -фазного выпрямления. Напомним прежде всего, что в случае отсутствия реактивности в цепи анодов дуга под-

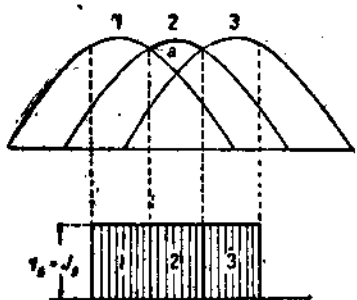


Рис. 178. Вид анодных токов без перекрытия и при наличии очень большой самоиндукции в цепи выпрямленного тока.

держивается только на одном аноде и именно на том, напряжение которого в данный момент выше, чем напряжения остальных анодов. Поэтому, в то мгновение, когда напряжение 2-й фазы сравняется с напряжением 1-й фазы, работавшей перед этим самостоятельно (точка a на рис. 178), дуга мгновенно перейдет с первого анода на второй, также внезапно прекратится ток 1-го анода, и появится ток во второй фазе. Анодные токи будут иметь форму импульсов прямоугольной формы, которые, следуя друг за другом, дадут идеальный прямой ток. Продолжительность протекания каждого импульса за-

висит от числа вторичных фаз трансформатора и равна $\frac{2\pi}{m}$.

Картина прохождения токов через аноды изменится, если мы в цепь каждого анода поместим самоиндукцию, реактивное сопротивление которой обозначим через x (рис. 179).

Вследствие наличия самоиндукции мгновенный переход дуги с анода на анод окажется невозможным, так же как и прямолинейный обрыв токов. С момента зажигания очередной фазы дуга постепенно будет переходить на новый анод с предыдущего, в течение некоторого времени перекрывая оба анода. Соответственно с этим, ток „затухающего“ анода станет постепенно убывать, а ток

„загорающегося“ анода будет постепенно возрастать. Э. д. с. самоиндукции, индуктируемая в первой фазе, будет повышать рабочее напряжение этой фазы, а э. д. с. самоиндукции второй фазы будет на такую же величину понижать напряжение своей фазы.

Перекрытие двух анодов прекратится в тот момент, когда ток первой фазы достигнет нулевого значения. Таким образом, вследствие наличия реактивных сопротивлений в установке, происходит затягивание перехода ртутной дуги с анода на анод, и оно очевидно будет тем больше, чем больше это индуктивное сопротивление.

Угол, величиной которого определяется продолжительность указанного процесса, обычно называют в литературе по ртутным выпрямителям углом перекрытия и выражают в электрических градусах. Мы его обозначим через μ .

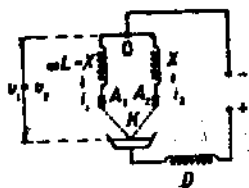


Рис. 179. Схема включения реактивных сопротивлений в цепь каждого анода.

3. Уравнения и форма анодных токов.

Обратимся снова к схеме рис. 179, на которой изображены две фазы трансформатора, пропускающие одновременно ток с помещенными в их цепи катушками самоиндукции. Через первый анод, затухающий, проходит ток i_1 , через второй—ток i_2 . Мгновенные значения э. д. с., действующих в этих фазах: e_1 и e_2 .

В таком случае напряжение первого анода, т. е. напряжение между нулевой точкой трансформатора с вторичной стороны и катодом, выразится уравнением:

$$v_1 = e_1 - x \frac{di_1}{dx}.$$

Точно так же для второго анода:

$$v_2 = e_2 - x \frac{di_2}{dx}.$$

Так как обе фазы имеют на катоде общую точку, то их напряжения в течение всего переходного периода будут одинаковы и равны напряжению по постоянного тока, т. е.

$$v_1 = v_2 = V_{gr}.$$

Складывая два предыдущих уравнения и принимая во внимание условие:

$$I_g = i_1 + i_2,$$

вытекающее из допущения совершенно прямолинейной формы выпрямленного тока, найдем:

$$v_1 = v_2 = V_{gr} = \frac{e_1 + e_2}{2}.$$

Это значит, что анодное напряжение во время перекрытия равно среднему арифметическому значению э. д. с. одновременно горящих фаз и является вместе с тем напряжением выпрямленного тока. Отсюда вытекает простой способ построения кривой напряжения постоянного тока на участке перекрытия по полусумме кривых э. д. с. соответствующих фаз, что и выполнено на рис. 180

(жирная линия). Законы изменения анодных токов первой и второй фаз определяются ур-ями:

$$x \frac{di_1}{dx} = e_1 - v_1 = e_1 - \frac{e_1 + e_2}{2} = \frac{e_1 - e_2}{2};$$

$$x \frac{di_2}{dx} = \frac{e_1 + e_2}{2}.$$

За начало отсчета на оси времени выберем момент зажигания дуги на втором аноде. Поэтому на рис. 180 положение оси ординат определится узловой точкой d , служащей пересечением напряжений холостого хода двух смежных во времени фаз трансформатора. Относительно этой оси э. д. с. e_1 и e_2 изменяются по закону:

$$e_1 = E_m \cos \left(x + \frac{\pi}{m} \right)$$

$$e_2 = E_m \cos \left(x + \frac{\pi}{m} - \frac{2\pi}{m} \right) =$$

$$= E_m \cos \left(x - \frac{\pi}{m} \right).$$

Рис. 180. Форма кривых анодных токов многофазного выпрямителя и вид кривой напряжения выпрямленного тока при горении одного или двух анодов.

После подстановки этих значений в дифференциальное уравнение тока первого анода получим:

$$i_1 = -\frac{E_m}{x} \sin \frac{\pi}{m} \int \sin x dx = \frac{E_m}{x} \sin \frac{\pi}{m} \cos x + C.$$

Определим постоянную C .

В момент зажигания дуги на втором аноде весь ток еще проходит через первый анод, поэтому при $x=0$

$$i_1 = I_g - \frac{E_m}{x} \sin \frac{\pi}{m}.$$

Следовательно:

$$C = I_g - \frac{E_m}{x} \sin \frac{\pi}{m},$$

и уравнение тока первой фазы примет вид:

$$i_1 = I_g - \frac{E_m}{x} \sin \frac{\pi}{m} (1 - \cos x).$$

Так как $I_g = i_1 + i_2$, то через второй анод будет одновременно проходить ток:

$$i_2 = \frac{E_m}{x} \sin \frac{\pi}{m} (1 - \cos x).$$

Горение дуги на первом аноде прекратится, когда ток его достигнет нулевого значения, так как в обратном направлении дуга тока не проводит. В этот момент $x=\alpha$, углу перекрытия.

Пользуясь этим условием, можно найти выражение для определения угла перекрытия μ .

В самом деле, $x = \mu$ и $i_1 = 0$, получим:

$$1 - \cos \mu = 2 \sin^2 \frac{\mu}{2} = \frac{x I_g}{E_m \sin \frac{\pi}{m}} \quad (203)$$

Из этого уравнения следует, что:

$$\frac{E_m \sin \frac{\pi}{m}}{x} = \frac{I_g}{1 - \cos \mu},$$

на основании чего уравнения анодных токов выразятся в более простом виде:

$$i_1 = I_g (1 - W) \quad (204)$$

и

$$i_2 = I_g W, \quad (205)$$

где

$$W = \frac{1 - \cos x}{1 - \cos \mu}.$$

Если, пользуясь выведенными уравнениями, построить анодные токи 1-й и 2-й фаз, то они примут форму, изображенную на рис. 180. Из этих кривых мы видим, что время, в течение которого протекает ток через каждый анод, можно разбить на три промежутка: первый промежуток длится от зажигания данного анода до потухания предыдущего, при этом ток первого анода постепенно спадает до нуля, ток второго возрастает до значения полного рабочего тока I_g , суммарный ток обоих анодов за время перекрытия тоже равен I_g ; второй промежуток характеризуется самостоятельной работой рассматриваемого анода, пропускающего ток I_g , вследствие чего отсутствует какое бы то ни было падение напряжения на анодных реактивных катушках; наконец третий промежуток аналогичен первому: в течение его затухает постепенно дуга на данном аноде и загорается на следующем. Продолжительность первого и третьего промежутков будет соответствовать μ градусам, а второго $\left(\frac{2\pi}{m} - \mu\right)$ градусам.

Итак мы нашли форму анодных токов и напряжение постоянного тока, приняв во внимание реактивные сопротивления только во вторичной цепи трансформатора, другими словами, мы учли влияние рассеяния вторичных обмоток трансформатора и анодных реактивных катушек.

4. Вид кривой напряжения выпрямленного тока при разных режимах нагрузки.

С возрастанием нагрузки на выпрямитель время перекрытия дугой двух анодов увеличивается, согласно уравнению (203), при этом анодное напряжение изменяется по кривой, представляющей полусумму напряжений одновременно работающих фаз трансформатора.

Нагрузка может возрасти до такой величины, когда анодное напряжение, создаваемое двумя фазами, успеет сравняться с фазной э. д. с. третьей фазы (точка b на рис. 181) прежде, чем ток анода 1 достигнет нулевого значения. В таком случае загорится и станет пропускать ток анод 3, питание внешней

цепи будет происходить от трех одновременно горящих анодов. Изменение анодного напряжения пойдет по кривой, представляющей собою, как нетрудно предвидеть на основании предыдущих рассуждений, среднее значение кривых напряжений трех перекрывающихся фаз. В тот момент, когда первая фаза прекратит подачу тока, чему на рис. 181 соответствует точка c , анодное напряжение быстро возрастает до точки d , лежащей на кривой второй и третьей фаз. Очевидно, что при дальнейшем увеличении нагрузки может установиться такой режим работы, когда поочередно будут работать группы из 3 и 4 анодов и т. д. На рис. 182 можно проследить постепенное изменение с увеличением нагрузки формы кривой анодного напряжения или, что все равно, кривой напряжения выпрямленного тока для шести-

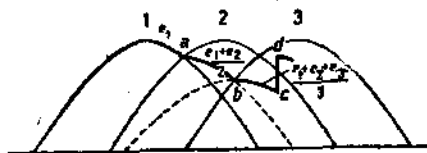


Рис. 181. Кривая анодного напряжения при одном, двух или трех анодах в работающей группе.

фазного выпрямителя. Буквы, стоящие сверху, соответствуют анодам, работающим в группе.

Сначала нагрузка очень мала, работает только одна фаза почти без перекрытия, при этом каждая фаза зажигается через 60° . Обозначим этот угол через α_1 . Второй участок кривой ab характеризует кривую напряжения при режиме работы, уже рассмотренном нами, когда нормально горит один анод и лишь в переходный период активность двух анодов поддерживается само-

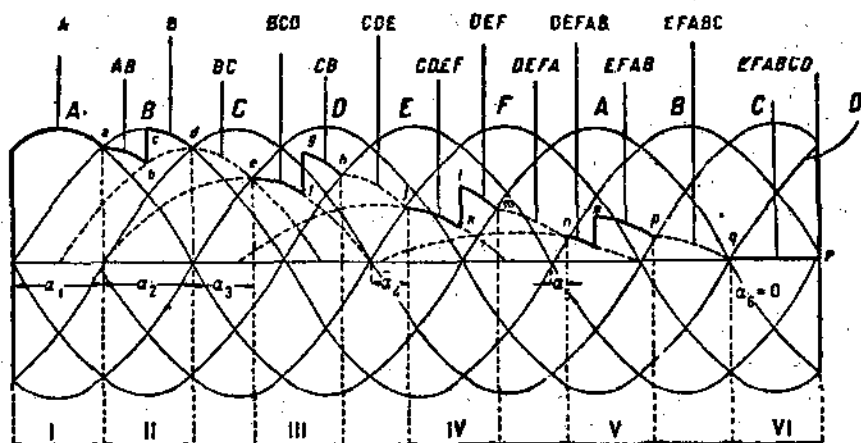


Рис. 182. Вид кривой анодного напряжения (или напряжения выпрямленного тока) при разных режимах нагрузки для шестифазного выпрямителя.

индукцией. Угол зажигания, так же как и в предыдущем случае, равен 60° , его мы обозначим через α_2 , имея в виду индексом 2 отметить наибольшее число фаз, одновременно работающих при данном режиме нагрузки. Затем по кривой de происходит переход к такому режиму, когда горят то два, то три анода. Угол зажигания α_3 уменьшается до 41° . Интерес представляет то обстоятельство, что фаза B пропускает ток еще в течение некоторого времени после перехода напряжения холостого хода этой фазы на отрицательную полярность, возможность чего объясняется наличием в обмотке этой фазы э. д. с. само-

Допустим, что горит анод A , следующий анод B вступит в работу, когда ось проекций займет положение Ot_1 , при котором проекция вектора OA равна проекции вектора OB . Если за начало отсчета углов примем нулевое положение линии проекций для вектора OB , т. е. положение t_{0B} , то мы заметим, что угол α_2 окажется равным углу зажигания фазы B .

Если работающие группы поочередно состоят из 2 или 3 анодов, то угол зажигания нового анода C будет $\alpha_3 = \angle t_1 Ot_2$ и вступит в группу, когда проекция его вектора окажется равной проекции вектора анодного напряжения на ту же ось, что осуществится при положении оси времени Ot_2 . Найдем теперь величину углов зажигания фаз при разных режимах нагрузки. Напомним, что под углом зажигания мы условились считать угол в электрических граду-

сах, который соответствует промежутку времени от момента прохождения через нуль э. д. с. фазы, вступающей в работу, до момента зажигания ее. Величина этого угла, как мы могли уже убедиться из кривой на рис. 182, зависит непосредственно от количества анодов, работающих в группе перед зажиганием новой фазы. Пусть в предшествующей группе горит $(n-1)$ анодов, а в следующей очередной группе n анодов. Условие присоединения n -ой фазы определяется соотношением, вытекающим из требования, чтобы в момент зажигания среднее напряжение $(n-1)$ горящих

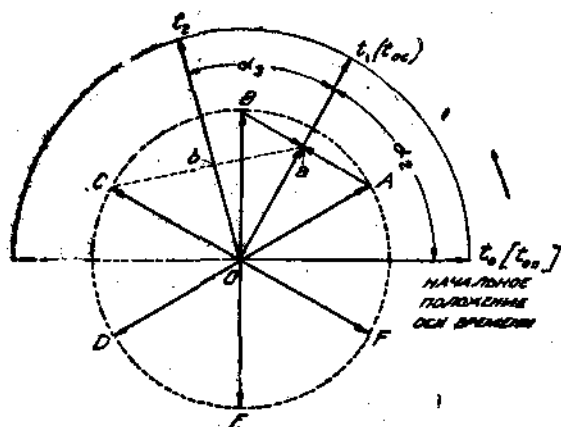


Рис. 183. Векторная диаграмма напряжений шестифазного выпрямителя.

анодов равнялось напряжению холостой работы n -ого анода (рис. 182), т. е. соотношением:

$$\frac{e_1 + e_2 + \dots + e_{n-1}}{n-1} = e_n$$

или

$$\frac{E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{m} \right) + E_m \sin \left(\omega t + 2 \frac{2\pi}{m} \right) + \dots + E_m \sin \left[\omega t + (n-1) \frac{2\pi}{m} \right]}{n-1} = E_m \sin \omega t.$$

Принимая во внимание, что $\omega t = \alpha_0$, раскрывая сначала скобки и произведя соответствующие преобразования, придем к ур-нию:¹

¹ Для преобразования написанного соотношения необходимо воспользоваться тригонометрическими формулами:

$$\sin x + \sin 2x + \dots + \sin kx = \sin \left(\frac{k+1}{2} \right) \cdot x \sin \frac{kx}{2}$$

и

$$1 + \cos x + \cos 2x + \dots + \cos kx = \frac{\sin \left(\frac{k+1}{2} \right) x \cos \frac{kx}{2}}{\sin \frac{x}{2}}$$

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{\sin \frac{n\pi}{m} \sin \frac{(n-1)\pi}{m}}{n \sin \frac{\pi}{m} - \sin \frac{n\pi}{m} \cos \frac{(n-1)\pi}{m}}, \quad (207)$$

по которому может быть определен угол зажигания, если известно количество работающих анодов в последующей группе.

В таблице 44 приведены вычисленные по этой формуле величины углов зажигания для 2-, 3- и 6-фазного выпрямления и разных режимов нагрузки. В ней же помещены наибольшие возможные значения углов перекрытия двух анодов в системах трехфазной и шестифазной, которые легко найти по углам зажигания. Так в трехфазной системе (рис. 184) угол зажигания в случае режима с горением трех анодов равен нулю, следовательно два анода могут одновременно работать при угле перекрытия не более 90° . У шестифазного выпрямителя этот угол равен 41° (точнее $40^\circ 54'$).

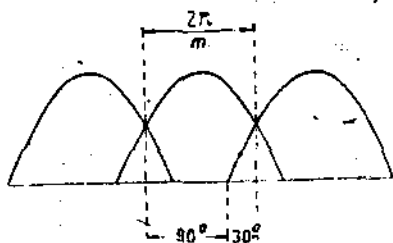


Рис. 184. Угол зажигания и угол перекрытия трехфазного выпрямителя.

Таблица 44.

Число фаз выпрямителя, m	Число анодов в группе, n	Угол зажигания, α	Максимальный угол перекры- тия, β_m
2	2	0°	
3	2	30°	90°
3	3	0°	
6	2	60°	$40^\circ 54'$
6	3	$40^\circ 54'$	
6	4	$23^\circ 25'$	
6	5	$8^\circ 57'$	
6	6	0°	

6. Графическое построение кривых анодных токов при одновременном горении нескольких анодов.

Для построения кривых анодных токов в данном случае можно избрать аналитический метод, как это было сделано в одном из предыдущих параграфов при рассмотрении режима работы с двумя анодами. Однако такой путь требует в случае параллельной работы нескольких анодов (более 2) довольно много вычислений.

Изложим поэтому очень простой способ графического решения задачи об отыскании формы кривой анодных токов при различных режимах нагрузки, разработанный Далленбахом и Герске (Dallenbach и Gerecke).

Остановимся на таком режиме работы при шестифазном выпрямлении, когда ток пропускают два или три анода. Кривая напряжения, соответствующая этому случаю, уже рассматривалась нами на рис. 182 (III) и приведена снова на рис. 185а. Построим осциллограмму токов, начиная с момента зажигания фазы С. Этот момент определяется углом зажигания $\alpha = 41^\circ$, так как выпрямитель шестифазный. Следующая очередная фаза D загорится при угле, равном $\gamma = \alpha + \frac{360}{m} = 101^\circ$. В интервале между углами α и γ должна погаснуть фаза А. Величина угла погасания β , при котором это произойдет, зависит от величины нагрузки и ограничена определенным пределом, после достижения которого при дальнейшем возрастании нагрузки число работающих анодов в группе увеличится на один. Для конкретности построения примем угол β равным 75° . Тогда погасание следующей фазы произойдет при угле

$$\beta' = \beta + \frac{360}{m} = 135^\circ.$$

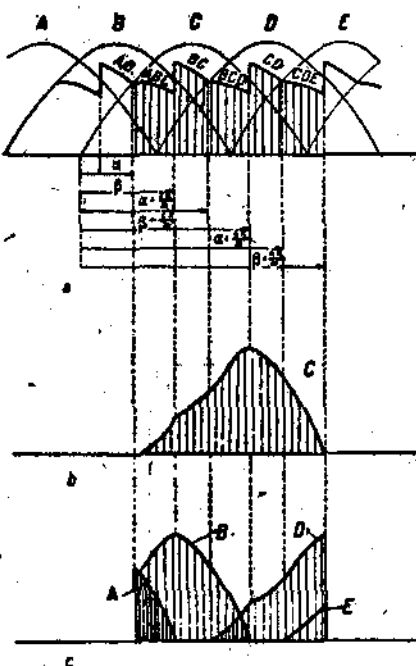


Рис. 185. Кривые анодных токов и кривая анодного напряжения при режиме одновременного горения двух или трех анодов.

дов в группе. Для этого обратимся прежде всего к диаграмме напряжений на рис. 186а. На ней А, В, С... векторы фазных напряжений, $\overline{O1}$ — вектор анодного напряжения трех горящих анодов, представляющий собой одну треть геометрической суммы векторов А, В, С. Геометрическая разность $\overline{1C} = \overline{OC} - \overline{O1}$ дает вектор, изображающий подынтегральную функцию, т. е.

$$e_k - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e_k.$$

Интегрирование вектора сопровождается поворотом его в сторону отрицательных вращений на 90° , деление же на x можно заменить соответствующим изменением масштаба тока.

Построение мгновенных значений токов произведено на диаграмме рис. 186б в полярных координатах.

По отношению к рис. 186а начальное положение оси времени x , повернуто на 90° по часовой стрелке; поэтому вектор $01'$ на этом рисунке представляет интеграл вектора $1C$ и соответствует переменной части тока, проходящего через анод C . В полярных координатах синусоида изображается двумя окружностями, построенными на самом векторе, как на диаметре, и на векторе обратном. Первая окружность изображает положительную полуволну синусоиды, вторая отрицательную. На фиг. 186б для тока фазы C описана пунктиром только отрицательная окружность около диаметра $0a$.

Мгновенные значения переменной составляющей анодного тока изобразятся проекциями вектора 01 на ось времени, концы конх будут лежать на описанной окружности.

Построение анодного тока начнем с того момента, когда зажигается фаза C , что должно произойти при угле $\alpha = 41^\circ$. В этот момент ось времени совпадет с диаметром $0a$, значит мгновенное значение переменной составляющей тока i_c отрицательно и совпадает по величине с диаметром. Но так как в момент зажигания тока $i_c = 0$, то к мгновенному значению, получаемому по полярной диаграмме, необходимо прибавить еще положительную постоянную составляющую, равную 01 . Она очевидно равна постоянной интегрирования в интеграле тока i_{max} и останется без изменения для последующих значений анодного тока до потухания фазы A , т. е. до положения оси времени, определяемым углом $\beta = 75^\circ$. Поэтому, если мы около точки 0 опишем дугу ac радиусом равным $0a$, то на заштрихованном участке между двумя дугами будут расположены отрезки линии времени, представляющие изменения анодного тока в первом интервале от α до β . От точки $x = \beta = 75^\circ$ до точки $x = \alpha + \frac{2\pi}{\pi}$ изменения напряжения выпрямленного

тока характеризуются вектором 02 , падение напряжения во вторичной обмотке трансформатора — вектором $2C$ и изменение тока вектором $02'$ (рис. 186б).

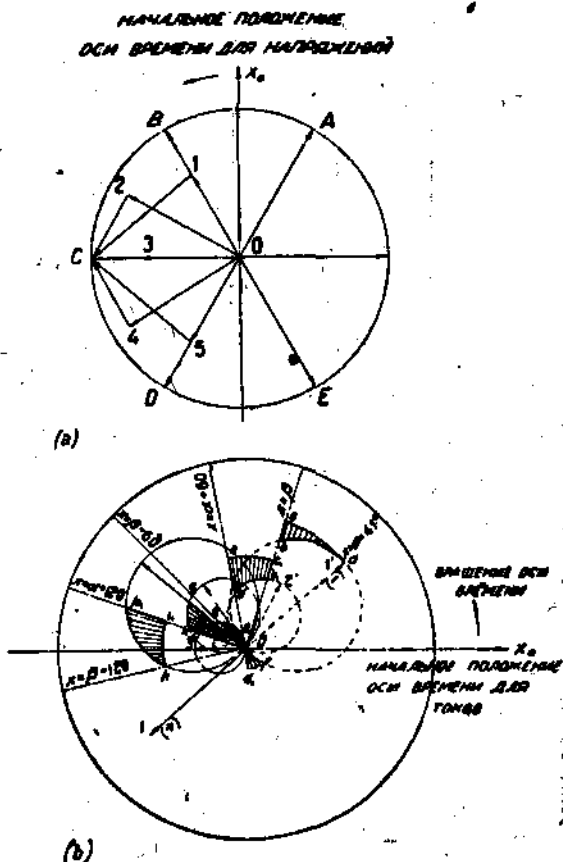


Рис. 186. Векторная диаграмма, служащая для построения кривых анодных токов.

Для $x = \beta$ хорда, отсекаемая на оси времени, отрицательна, но ток в этот момент должен быть положителен и равняться bc . Отложим поэтому $b_1c_1 = bc$, затем опишем дугу c_1e радиусом равным OC_1 , тогда на заштрихованной пло-

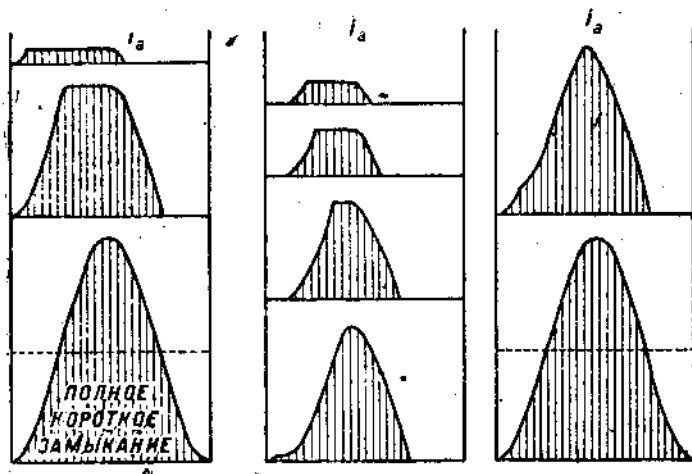


Рис. 187. Кривые анодных токов при разных нагрузках — от небольшой до полного короткого замыкания — для двух- и трехфазного выпрямления.

щади b_1c_1de получим отрезки оси времени, представляющие кривую тока во втором интервале времени. В третьем интервале времени от $x = a + \frac{2\pi}{m}$ до

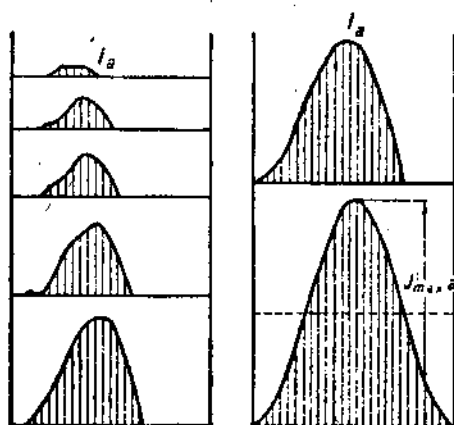


Рис. 188. Кривые анодных токов при разных нагрузках — от небольшой до полного короткого замыкания — для шести-фазного выпрямления.

фазой C от момента ее загорания до погасания. Это нетрудно сделать без каких-либо добавочных построений, принимая во внимание лишь смещение во времени анодных токов. Поэтому например кривая тока анода D на $\frac{2\pi}{m}$ смещена

$x = \beta + \frac{2\pi}{m}$ горят снова три анода: B, C, D (рис. 186а). Вектор анодного напряжения $O\beta$, вектор рассеяния $C\beta$. Окружность тока положительна. При $x = a + \frac{2\pi}{m} + 60^\circ = 101^\circ$ хорда круга положительна и равна Oe_1 , но к этому времени значение тока было de , отрезок Oe_1 меньше de_1 , поэтому около точки O опишем дугу радиусом d_1f , тогда отрезки на линии времени между дугами ge_1 и d_1f дадут значения анодного тока в рассматриваемом интервале времени. Точно таким же путем выполнено построение кривых анодного тока фазы C в 4-м и 5-м интервалах времени.

Полная осциллограмма анодного тока приведена на рис. 185б. На рисунке же 185с построены кривые токов остальных фаз, работающих одновременно с

относительно кривой тока анода C в сторону отставания. В каждый момент времени сумма токов всех анодов равна постоянному току $I_g = \text{const}$. На рис. 187 и 188 приведены построенные таким путем осциллограммы кривых анодных токов для двух- трех- и шестифазного выпрямителей при изменении нагрузки от небольшой до полного короткого замыкания, сила тока которого определяется по формуле:

$$i_{k \max} = \frac{m E_m}{x}, \quad (208)$$

где m — число фаз, а E_m — вторичное фазное напряжение (амплитуда).

Из кривых видно, как постепенно кривая тока с увеличением нагрузок приближается к синусоиде, и как при полном коротком замыкании ток через анод протекает весь период; при этом его можно представить себе, как сумму постоянной составляющей, равной среднему значению анодного тока за период и наложенной на нее переменной составляющей.

Примечание. Из графического метода построения кривых анодных токов ясен ход и аналитического способа построения. В самом деле, ток какого-либо анода в течение первого интервала времени выразится ур-ем:

$$i_n = \frac{1}{x} \int \left(e_n - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} e_k \right) dx + C_1.$$

Постоянную интегрирования определяем из первого начального условия: при угле зажигания α ток зажигающегося n -го анода равен нулю:

$$i_{n\alpha} = 0.$$

Выражение $e_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} e_k$ нетрудно составить, имея в виду, что e_k — мгновенное значение напряжения рассматриваемой фазы, а

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} e_k$$

есть среднее арифметическое значение напряжения n работающих фаз.

Для второго участка времени ур-ние имеет вид:

$$i_n^{\text{II}} = \frac{1}{x} \int \left(e_n - \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{k=n-1} e_k \right) dx + C_{\text{II}},$$

так как на этом участке работает только $(n-1)$ фаз и постоянная C_{II} определяется из второго условия: при угле β , ток

$$i_{n\beta}^{\text{II}} = i_{n\alpha}^{\text{I}}$$

и т. д.

7. Предварительное зажигание фаз.

Из предыдущего следует, что разность между углом погасания любой фазы и углом зажигания следующей очередной фазы, т. е. $\beta - \alpha$, определяет продолжительность одновременного горения n анодов, или, иначе говоря, время их перекрытия. При данном α , взятом из таблицы 44, величина этой разности зависит от угла β , изменяющегося с нагрузкой от нуля до некоторого предельного значения.

Может случиться, что угол β будет превосходить угол α на небольшую величину, тогда процесс выпрямления приобретает интересную особенность, благодаря которой кривые анодных токов несколько видоизменяются по сравнению с изображенными на рис. 186.

Возьмем для примера только-что нами рассмотренный случай нагрузки с максимальным числом горящих в группе анодов равным 3, но допустим, что угол погасания равен не 75° , как мы сделали при построении предыдущей осциллограммы тока, а только 50° (рис. 189). Загорание фазы С по-прежнему происходит в точке a . Кривые тока и напряжения сначала изменяются согласно предыдущему графику на рис. 186. Но на пятидесятом градусе от момента

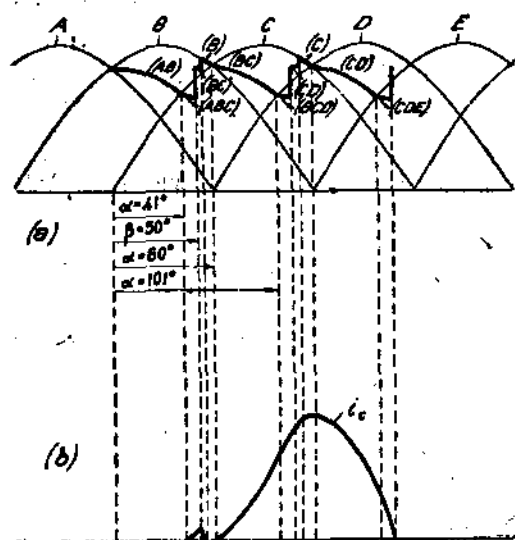


Рис. 189. Форма напряжения и анодного тока в случае предварительного зажигания фаз перед вступлением в проводящую группу третьей фазы.

буквы V , затем наступает перерыв в течении тока, и после этого пройдет основная полоса тока.

Таким образом рассмотренный режим работы характеризуется последовательным горением трех, одного и двух анодов и предварительным зажиганием на короткое время каждой фазы, до ее окончательного вступления в работающую группу.

Диапазон разности $\beta - \alpha$, при которой может происходить указанное явление предварительного зажигания, сравнительно невелик, мало также количество энергии, передаваемое кратковременным импульсом тока, поэтому практического значения указанное явление не имеет и принимать его во внимание при дальнейших наших выводах мы не будем.

8. Форма кривых токов в первичных обмотках трансформатора и в линии.

Способы включения первичных и вторичных обмоток трансформатора видоизменяют кривые первичных токов и токов, текущих в линии. Схемы питания

ртутных выпрямителей, как это следует из главы III этой части, можно разделить на две группы: вызывающие добавочный поток утечки в трансформаторе в схемы с уравновешенными ампервитками на кернах.

К схемам первой группы относятся на применяемых на практике:

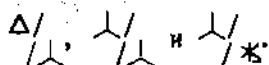
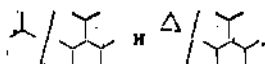
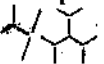


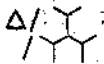
ТАБЛИЦА 45

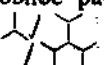
К ПОСТРОЕНИЮ КРИВЫХ ПЕРВИЧНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ТОКОВ ДЛЯ СХЕМ ПИТАНИЯ



№ по пор.	Рабочие аноды	Токи в первичных обмотках			Токи в линии для схем 		
		i_1'	i_1''	i_1'''	$i_{L1} = i_1' - i_1'''$	$i_{L2} = i_1'' - i_1'$	$i_{L3} = i_1''' - i_1''$
1	5,6	$+(i_2 + i_3)$	$-i_3$	$-i_3$	$+i_2 + 2i_3$	$-2i_3 - i_2$	$+i_2 - i_3$
2	6	$+i_2$	0	$-i_3$	$+2i_3$	$-i_2$	$-i_3$
3	6,1	$+i_2$	$+i_1$	$-(i_1 + i_3)$	$+i_1 + 2i_3$	$+i_1 - i_2$	$-2i_1 - i_3$
4	1	0	$+i_1$	$-i_1$	$+i_1$	$+i_1$	$-2i_1$
5	1,2	$-i_2$	$+(i_1 + i_3)$	$-i_1$	$+i_1 - i_2$	$+i_1 + 2i_3$	$+2i_1 - i_2$
6	2	$-i_2$	$+i_3$	0	$-i_2$	$+2i_3$	$+i_2$
7	2,3	$-(i_2 + i_3)$	$+i_2$	$+i_2$	$-(i_2 + 2i_3)$	$+2i_3 + i_2$	$+i_2 - i_3$
8	3	$-i_3$	0	$+i_2$	$-2i_3$	$+i_2$	$+i_2$
9	3,4	$-i_3$	$-i_2$	$+(i_2 + i_3)$	$-2i_2 - i_3$	$+i_2 - i_3$	$+i_2 + 2i_3$
10	4	0	$-i_2$	$+i_2$	$-i_2$	$-i_2$	$+2i_2$
11	4,5	$+i_3$	$-(i_2 + i_3)$	$+i_2$	$-i_2 + i_3$	$-i_2 - 2i_3$	$+2i_2 + i_3$
12	5	$+i_3$	$-i_2$	0	$+i_3$	$-2i_3$	$+i_3$

Ко второй же группе следует отнести прежде всего схемы со вторичными обмотками трансформатора, соединенными зигзагом, и схему с междофазовой катушкой (с некоторой оговоркой) (см. гл. III). Из них очень распространена схема с двойным зигзагом , применяемая заводом „Электросила“, фирмой AEG и (в некоторых случаях) фирмой BBC.

Мы ограничимся более подробным рассмотрением только схемы со двойным зигзагом, поставив себе задачей выяснить метод построения кривых токов в первичных обмотках и в линии для .

На схеме рис. 190а показано условное распределение токов в обмотках трансформатора соединенного по схеме . На каждом керне расположено 4 обмотки.

Число витков в каждой обмотке одно и то же и равно w .

Расположение обмоток на кернах должно быть симметрично в магнитном отношении. В виду отсутствия добавочных потоков утечки ампервитки на каждом керне трансформатора взаимно уравновешиваются, на основании чего можно написать три уравнения:

$$\begin{aligned} i_1' &= i_3 + i_6 - i_2 - i_5, \\ i_1'' &= i_1 + i_3 - i_4 - i_6, \\ i_1''' &= i_3 + i_4 - i_1 - i_6, \end{aligned}$$

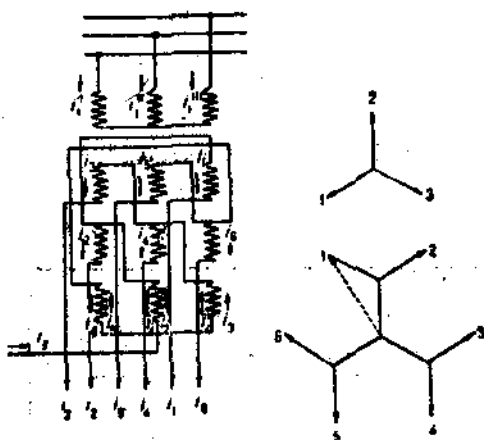


Рис. 190а. Схема включения и распределение токов в трансформаторе выпрямителя, соединенном по схеме звезда — двойной зигзаг.

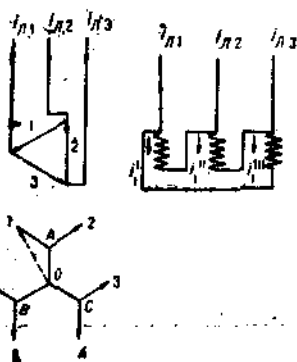
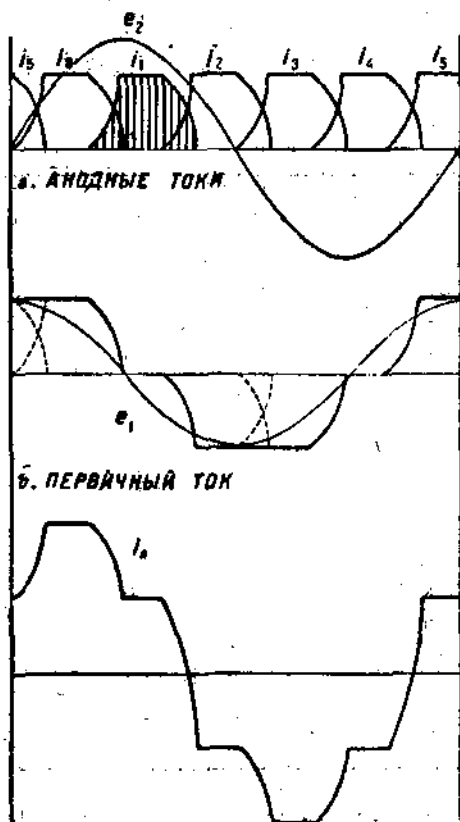


Рис. 190б. Схема включения и распределение токов в трансформаторе выпрямителя, соединенном по схеме треугольник — двойной зигзаг.



в. ТОК В ЛИНИИ

Рис. 191. Кривые токов анодных, первичных и в линии.

которые позволяют легко построить кривые первичных токов. Начнем рассмотрение с момента зажигания первой фазы и составим таблицу 45 последовательных значений первичных токов за период в зависимости от величины анодных токов.

По этой таблице на рис. 191б построена кривая первичного тока, а следовательно, и тока в линии первой фазы, кривые токов двух других фаз будут очевидно аналогичны, но сдвинуты на 120° .

В том случае, когда первичная обмотка соединена треугольником (рис. 190б), форма токов в линии будет иной, чем в первичных обмотках. Применяя закон

Кирхгофа к узловым точкам, в которых сходятся первичные и линейные токи, найдем интересующие нас соотношения между этими токами:

$$\begin{aligned} i_{A1} &= i_1' - i_1''' \\ i_{A2} &= i_1'' - i_1''' \\ i_{A3} &= i_1''' - i_1' \end{aligned}$$

Пользуясь же выражениями первичных токов через анодные в таблице 45, легко непосредственно выразить токи, текущие в питающих фидерах, через анодные, что сделано в той же таблице. На рис. 191 с на основании полученных соотношений построена кривая тока в первом фидере. Кривые токов двух других фидеров будут такой же формы, но со смещением по фазе на 120° .

9. Внешняя характеристика ртутного выпрямителя при разных нагрузках.

а. Работает не более двух анодов в группе. Пренебрегая в главе I падением напряжения во всех элементах ртутно-выпрямительной установки, мы получили зависимость между напряжением со стороны выпрямленного тока и вторичной э. д. с. трансформатора, выражаемую формулой:

$$V_{g0} = E_m \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}$$

При сделанных допущениях V_{g0} не меняется с изменением нагрузки, и внешняя характеристика выражается прямой линией, параллельной оси нагрузок.

Примем теперь во внимание реактивное падение напряжения в анодных цепях ртутного выпрямителя и рассмотрим сначала такой режим нагрузки, который не требует одновременной работы более двух анодов в схемах с неразделенной нулевой точкой во вторичных обмотках трансформатора. О характеристике выпрямителя с междупазовой катушкой будем говорить особо.

Уравнение внешней характеристики выпрямителя при новых условиях легко найти, исходя из рассмотрения кривой напряжения на рис. 180.

Определяя по ней среднее арифметическое значение рабочего напряжения, найдем:

$$V_g = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{m}} \frac{e_1 + e_2}{2} dx + \int_{\frac{\pi}{m}}^{\frac{2\pi}{m}} \cos \left(x - \frac{\pi}{m} \right) dx \right];$$

так как

$$\frac{e_1 + e_2}{2} = \cos \left(x + \frac{\pi}{m} \right) + \cos \left(x - \frac{\pi}{m} \right),$$

то, делая соответствующие преобразования и произведя интегрирование, получим:

$$V_g = E_m \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos^2 \frac{\pi}{2}. \quad (209)$$

Сравнивая это выражение с вышезаписанным для холостой нагрузки, найдем:

$$V_g = V_{g0} \cos^2 \frac{\pi}{2} = V_{g0} \left(1 - \sin^2 \frac{\pi}{2} \right). \quad (210)$$

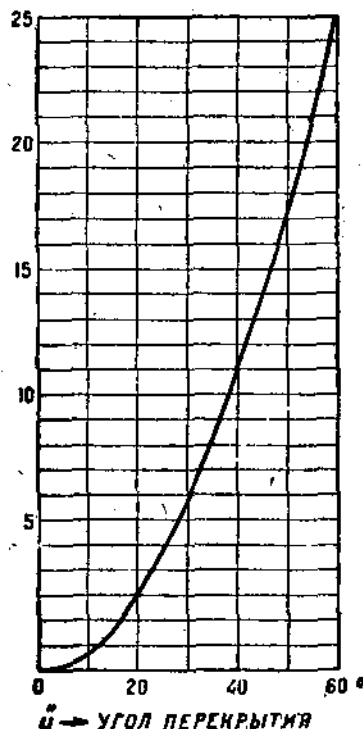
Таким образом изменение внешнего напряжения ртутного выпрямителя, вызываемое наличием реактивных сопротивлений в анодных цепях может быть непосредственно и просто выражено через угол перекрытия α при условии, что в одновременной работе участвуют не более двух анодов.

Относительное падение напряжения постоянного тока будет равно:

$$\frac{\Delta V_g}{V_{g0}} = \frac{V_{g0} V_g}{V_{g0}^2} \times 100\% = \sin^2 \frac{\alpha}{2} = \epsilon \quad (211)$$

и имеет вид кривой, представленной на рис. 192; угол же перекрытия, как нам уже известно, легко вычисляется по формуле (203) на стр. 243. Однако имеется возможность получить уравнение внешней характеристики ртутного выпрямителя в иной более удобной для практических целей форме. В самом деле, упомянутое уравнение (203) имеет вид:

$\Sigma \%$



$\alpha \rightarrow$ УГОЛ ПЕРЕКРЫТИЯ

Рис. 192. Относительное падение напряжения ϵ со стороны выпрямленного тока в зависимости от угла перекрытия α .

$$\sin^2 \frac{\pi}{2} = \frac{x}{2} \frac{I_g}{E_m \sin \frac{\pi}{m}}$$

С другой стороны при режиме полного короткого замыкания, когда работают все m анодов, максимальное значение силы выпрямленного тока равно:

$$I_k = \frac{m E_m}{x}$$

Последние два выражения вместе с уравнением (211) дают относительное падение напряжения постоянного тока в виде:

$$\epsilon = \frac{V_{g0} - V_g}{V_g} = A \frac{I_g}{I_k}, \text{ где } A = \frac{m}{2 \sin \frac{\pi}{m}}$$

В таком случае уравнение внешней характеристики примет простой вид:

$$V_g = V_{g0} \left(1 - A \frac{I_g}{I_k} \right). \quad (212)$$

Значения коэффициента A для выпрямителей с разным числом фаз таковы:

ТАБЛИЦА 46.

m	$A = \frac{m}{2 \sin \frac{\pi}{m}}$	m	$A = \frac{m}{2 \sin \frac{\pi}{m}}$
2	0,84	6	5,73
3	1,43	12	22,90

Вышеприведенные ур-ния полезны в том отношении, что дают возможность построить внешнюю характеристику ртутного выпрямителя для того случая, когда имеются анодные катушки.

Однако применение этих ур-ний ограничено требованием, чтобы угол перекрытия μ был не более тех значений, которые указаны в таблице 44. Теперь мы поставим вопрос о внешней характеристике в более общем виде.

б. Напряжение выпрямителя при одновременной работе нескольких анодов в группе (более двух). Будем иметь в виду кривую рис. 182, характеризующую изменение напряжения выпрямленного тока, и допустим, что дуга распределяется не более чем на n анодов.

Тогда для любого активного анода справедливо соотношение (см. стр. 245):

$$V_{gt} = e_k - x \frac{di_k}{dx},$$

где V_{gt} — мгновенное значение напряжения выпрямленного тока. Наше рассмотрение начнем с того момента времени, когда зажигается 1-й анод и аноды, одновременно с ним работающие, будут: 2, 3, ..., k , ..., n .

Кривая напряжения есть функция периодическая с периодом $\frac{2\pi}{m}$. В таком случае среднее значение напряжения со стороны постоянного тока выразится интегралом:

$$V_g = \frac{m}{2\pi} \int_a^{\gamma = \alpha + \frac{2\pi}{m}} \left(e_k - x \frac{di_k}{dx} \right) dx,$$

откуда имеем:

$$V_g = \frac{m}{2\pi} \left[\int_a^{\gamma} (e_k dx) - x(i_{k\gamma} - i_{ka}) \right],$$

где α — угол зажигания первого анода, $i_{k\gamma}$ и i_{ka} — значения тока k -го анода в точках α и γ . Из последнего соотношения следует, что:

$$i_{k\gamma} - i_{ka} = \frac{1}{x} \left(\int_a^{\gamma = \alpha + \frac{2\pi}{m}} e_k dx - \frac{2\pi}{m} V_g \right),$$

или, обозначив для краткости правую часть через A_k , напомним:

$$i_{k\gamma} = i_{ka} + A_k \quad (a)$$

Кривые анодных токов смещены друг относительно друга на $\frac{2\pi\alpha}{m}$, следовательно, ток k -го анода при угле α должен равняться току $(k-1)$ -го анода в точке $\gamma = \alpha + \frac{2\pi}{m}$, т. е.

$$i_{ka} = i_{(k-1)\gamma}.$$

при условии, что фазы, предшествующие первой фазе во времени, будут последовательно: 2, 3, ..., k , ..., n .

Пользуясь последними двумя уравнениями и имея в виду, что при угле α $i_{1\alpha} = 0$ и что между α и $\gamma = \alpha + \frac{2\pi}{m}$ потухает n -ый анод, мы сможем написать следующую систему равенств:

$$\begin{aligned} i_{1\gamma} &= i_{1\alpha} + A_1 = A_1 \text{ (так как } i_{1\alpha} = 0); \\ i_{2\gamma} &= i_{2\alpha} + A_2 = A_1 + A_2; \\ &\dots \dots \dots \\ i_{k\gamma} &= i_{k\alpha} + A_k = A_1 + A_2 + \dots + A_k; \\ &\dots \dots \dots \\ i_{(n-1)\gamma} &= i_{(n-1)\alpha} + A_{n-1} = A_1 + A_2 + \dots + A_k + \dots + A_{n-1}; \\ i_{n\gamma} &= 0. \end{aligned}$$

Но

$$I_g = i_{1\gamma} + i_{2\gamma} + \dots + i_{n\gamma},$$

поэтому

$$I_g = (n-1) A_1 + (n-2) A_2 + \dots + A_{n-1} = \sum_{k=1}^{n-1} (n-k) A_k;$$

и так как

$$A_k = \frac{1}{x} \left(\int_{\alpha}^{\gamma} e_k dx - \frac{2\pi}{m} V_g \right),$$

то:

$$I_g x = \sum_{k=1}^{n-1} (n-k) \left(\int_{\alpha}^{\gamma} e_k dx - \frac{2\pi}{m} V_g \right).$$

Далее:

$$\int_{\alpha}^{\gamma = \alpha + \frac{2\pi}{m}} e_k dx = E_m \sin \left(\alpha + \frac{2k-1}{m} \pi \right) \sin \frac{\pi}{m}$$

и

$$\sum_{k=1}^{n-1} (n-k) V_g = \frac{n(n-1)}{2} V_g.$$

Наконец из уравнения полного тока короткого замыкания следует:

$$x = \frac{m E_m}{I_g}.$$

Принимая во внимание последние соотношения и произведя соответствующие преобразования и подстановки, получим в окончательном виде уравнение внешней характеристики ртутного выпрямителя:

$$V_g = \frac{\pi E_m}{n(n-1)\pi} \left[2 \sum_{k=1}^{n-1} (n-k) \sin \left(\alpha + \frac{(2k-1)\pi}{m} \right) \sin \frac{\pi}{m} - \frac{m I_g}{I_k} \right]. \quad (213)$$

Подставляя в это уравнение величины углов зажигания из таблицы 44 при разном числе одновременно горящих анодов, получим таблицу 47, дающую возможность построить внешнюю характеристику ртутного выпрямителя при увеличении нагрузки от режима полного короткого замыкания.

ТАБЛИЦА 47
(к уравнению 213).

m	n	$\frac{V_g}{E_m}$	m	n	$\frac{V_g}{E_m}$
2	2	$\frac{2}{\pi} \left[1 - \frac{I_g}{I_h} \right]$	6	3	$\frac{\sqrt{7}}{\pi} \left[1 - \frac{6}{\sqrt{7}} \frac{I_g}{I_h} \right]$
3	2	$\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \left[1 - \sqrt{3} \frac{I_g}{I_h} \right]$	6	4	$\frac{\sqrt{19}}{2\pi} \left[1 - \frac{6}{\sqrt{19}} \frac{I_g}{I_h} \right]$
3	3	$\frac{3}{2\pi} \left[1 - \frac{I_g}{I_h} \right]$	6	5	$\frac{3\sqrt{31}}{10\pi} \left[1 - \frac{6}{\sqrt{31}} \frac{I_g}{I_h} \right]$
6	2	$\frac{3}{\pi} \left[1 - 6 \frac{I_g}{I_h} \right]$	6	6	$\frac{6}{5\pi} \left[1 - \frac{I_g}{I_h} \right]$

10. Построение внешних характеристик на основании выведенных соотношений.

а. Работа при режиме попеременного горения одного или двух анодов.

По данным таблицы 47 построены на рис. 193 внешние характеристики трехфазного и шестифазного выпрямителей. По оси абсцисс отложены отношения тока нагрузки I_g к току полного короткого замыкания I_h , а по оси ординат отношение: $\frac{V_g}{V_{g0}}$ в %.

Из их рассмотрения мы замечаем, что внешняя характеристика ртутного выпрямителя изображается прямой линией, наклон коей определяется непосредственно числом фаз и величиной тока полного короткого замыкания.

Такой вид внешние характеристики будут иметь до тех пор, пока при перекрытии будут работать не более двух анодов, при этом мы имеем в виду схемы питания без разделительной катушки. О характеристике выпрямителей с такой катушкой будет сказано ниже.

б. Нагрузка изменяется от нуля до полного короткого замыкания. Уравнение характеристики (213) и вытекающая из него таблица 47 дают возможность построить полную внешнюю характеристику ртутного выпрямителя при изменении нагрузки от холостой до тока полного короткого замыкания, что и сделано на рис. 194 для двухфазного, трехфазного и шестифазного выпрямителей.

Эти характеристики состояются из отрезков прямых линий, все более пологих по мере приближения нагрузки к току полного короткого замыка-

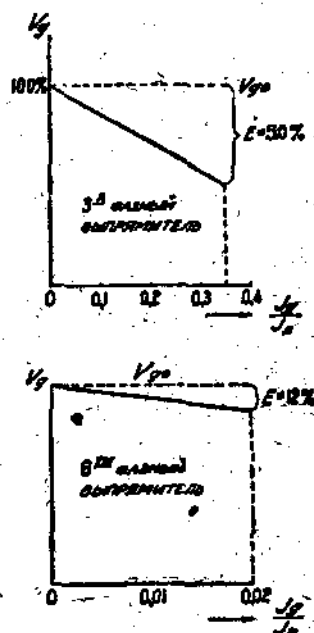


Рис. 193. Внешние характеристики трехфазного и шестифазного ртутных выпрямителей при режиме попеременного горения одного или двух анодов.

ния. Число отрезков на единицу меньше числа фаз. Следует указать, что при выводе общего ур-ния внешней характеристики мы не приняли во внимание явления предварительного зажигания фаз, о котором говорилось на стр. 251 — 252, что будет происходить при переходе от режима с n анодами к режиму с $n+1$ анодами. Можно было бы доказать справедливость выведенного выше обоб-

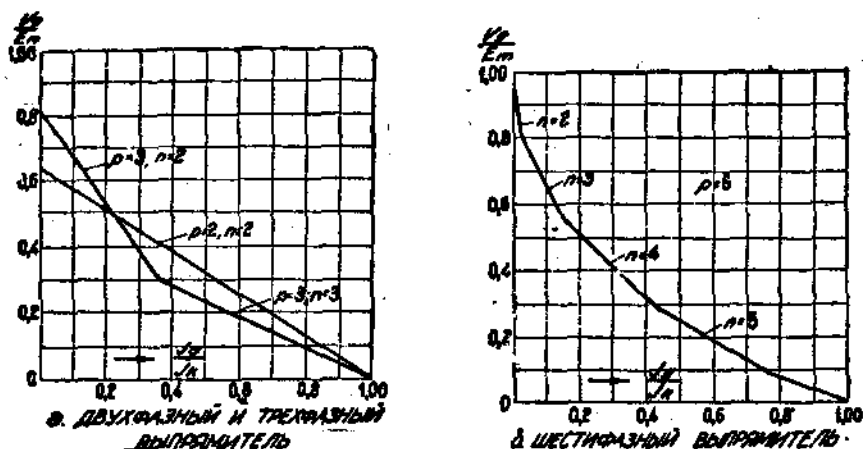


Рис. 194. Внешние характеристики двух-, трех- и шестифазного ртутных выпрямителей, с реактивными сопротивлениями, сосредоточенными в цепях анодов, при изменении нагрузки от нуля до полного короткого замыкания.

щенного ур-ния внешней характеристики и на случай переходного режима. Однако за недостатком места мы этого делать не будем.

Необходимо кроме того иметь в виду, что выведенные выше соотношения и построенные по ним характеристики относятся к таким системам выпрямления, у которых индуктивные сопротивления полностью сосредоточены в анодных цепях. Реальные условия работы выпрямителя могут в значительной степени изменить эти соотношения.

1Г. Эффективное значение анодного тока n -фазного выпрямителя при наличии индуктивности в цепях анода.

Зная форму анодного тока и приближенные ур-ния, выражающие закон изменения этого тока по отдельным интервалам времени, не трудно найти эффективное значение его. Как видно из рис. 195, в период первого перекрытия анодный ток изменяется по закону:

$$i'_a = I_g W,$$

где

$$W = \frac{1 - \cos \alpha}{1 - \cos \alpha''}.$$

При самостоятельном горении рассматриваемого анода проходящий через него ток:

$$i'_a = I_g$$

Наконец в период второго перекрытия, когда анод постепенно выходит из работы:

$$i'''_a = I_g (1 - W).$$

Эффективное значение анодного тока в таком случае выразится в следующем виде:

$$I_{a\Phi} = \frac{I_g^2}{2\pi} \left[\int_0^a (1-W)^2 dx + \left(\frac{2\pi}{m} - a \right) + \int_0^a W^2 dx \right].$$

Преобразовывая и упрощая это выражение, найдем:

$$I_{a\Phi} = I_g^2 \left[\frac{2\pi}{m} - 2 \int_0^a (W - W^2) dx \right]$$

или

$$I_{a\Phi} = \frac{I_g^2}{\sqrt{m}} \sqrt{1 - m \cdot \psi(u)}, \quad (214)$$

где

$$\begin{aligned} \psi(u) &= \frac{1}{\pi} \int_0^a (W - W^2) dx = \frac{1}{\pi} \int_0^a \left[\frac{1 - \cos x}{1 - \cos u} - \left(\frac{1 - \cos x}{1 - \cos u} \right)^2 \right] dx = \\ &= \frac{(2 + \cos u) \sin u - (1 + 2 \cos u) u}{2\pi(1 - \cos u) 2}. \end{aligned}$$

Последнее выражение целесообразно разложить в ряд; тогда, ограничиваясь двумя первыми членами разложения, получим простое

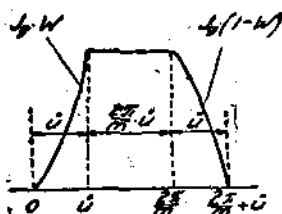


Рис. 195. Вспомогательный график для определения эффективного значения анодного тока выпрямителя.

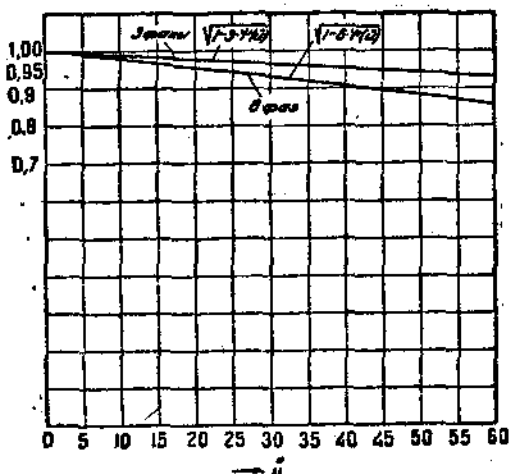


Рис. 196. Зависимость функции $\sqrt{1 - m \cdot \psi(u)}$ от угла перекрытия u .

выражение для вычисления функции $\psi(u)$, если угол перекрытия u не больше 90° .

$$\psi(u) = \frac{2u}{15\pi} \left(1 + \frac{u^2}{84} \right). \quad (215)$$

Если бы мы рассматривали работу выпрямителя, пренебрегая индуктивными сопротивлениями в цепях анодов, то эффективное значение анодного тока оказалось бы равным $I_{a\Phi} = \frac{I_g^2}{\sqrt{m}}$.

Теперь, обращаясь к выведенной формуле (215), мы видим, что индуктивное

влияние сказалось в появлении поправочного множителя,

$$\sqrt{1 - m\psi(\bar{u})},$$

являющегося некоторой функцией угла перекрытия, который в свою очередь зависит от четырех факторов: индуктивного сопротивления x , напряжения трансформатора, величины тока нагрузки I_g и числа фаз выпрямления (см. форм. 203).

Изменения найденного поправочного множителя, как функции угла перекрытия $\bar{u}$, представлены графически на рис. 196 для $m=3$ и $m=6$. Это почти прямые линии с наклоном в сторону увеличения угла $\bar{u}$. Из них видно, что при шестифазном выпрямлении и угле перекрытия $\bar{u}=40^\circ$ действительный ток на 10% меньше вычисленного по формуле $\frac{I_g}{\sqrt{m}}$, при трехфазном же токе эта разница окажется равной только 5%.

12. Токи и мощность трансформатора в схемах.

а. Вторичные обмотки. Вторичная обмотка трансформатора в схемах со вторичным сдвоенным зигзагом состоит из шести крайних обмоток и трех средних. Очевидно, что крайние обмотки работают как у шестифазного выпрямителя, а средние нагружены так, как при трехфазном выпрямлении. Поэтому действующие значения токов для крайних и средних обмоток оказываются, соответственно, равными:

$$I_{2 \text{ кр. ф.}} = \frac{I_g}{\sqrt{6}} \sqrt{1 - 6\psi(\bar{u})} \quad (216)$$

$$I_{2 \text{ ср. ф.}} = \frac{I_g}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - 3\psi(\bar{u})} \quad (217)$$

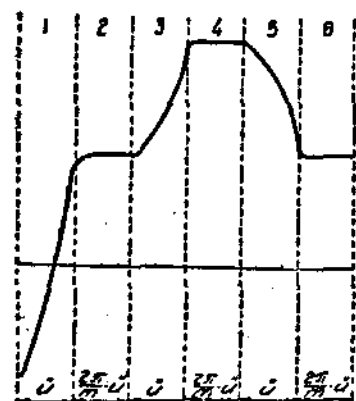


Рис. 197. Кривая тока в линии за полупериод при включении трансформатора выпрямителя по схеме треугольник — сдвоенный зигзаг.

б. Первичные обмотки. Рассмотрим кривую первичного тока, построенную на рис. 191б и характеризующую изменение этого тока за период. Кривая состоит из двух импульсов тока, совершенно одинаковых по форме, но повернутых друг относительно друга на 180° . Не трудно убедиться в том, что каждый из этих импульсов имеет форму такую же, как и анодный ток трехфазного выпрямителя и поэтому эффективное

значение первичного тока будет в $\sqrt{2}$ раз больше эффективного значения анодного тока трехфазной системы, т. е.

$$I_{1 \text{ ф.}} = \frac{I_g \sqrt{2} \sqrt{1 - 3\psi(\bar{u})}}{\sqrt{3}} \quad (218)$$

в. Питающая линия. Если первичная обмотка трансформатора соединена звездой, то токи в обмотках совпадают с токами в линии, т. е. применяется формула (218).

Остается особо разобрать схему с первичным треугольником. Кривая тока

в линии за полупериод изображена на рис. 197. Полупериод разделен на 6 интервалов.

Значения токов, протекающих в течение каждого интервала, определяются следующими уравнениями:

$$1\text{-й интервал: } i_1 = I_g[W - (1 - W)] = I_g(2W - 1),$$

$$2\text{-й } i_2 = I_g,$$

$$3\text{-й } i_3 = I_g(1 + W),$$

$$4\text{-й } i_4 = 2I_g,$$

$$5\text{-й } i_5 = I_g[1 + (1 - W)] = I_g(2 - W),$$

$$6\text{-й } i_6 = I_g.$$

Действующее значение тока в линии I_A выразится суммой такого вида:

$$\pi I_A^2 = \int_0^a i^2 dx + \left(\frac{2\pi}{m} - u\right) i_1^2 + \int_0^a i_2^2 dx + \left(\frac{2\pi}{m} - u\right) i_4^2 + \\ + \int_0^a i_5^2 dx + \left(\frac{2\pi}{m} - u\right) i_6^2,$$

или

$$\pi I_A^2 = I_g^2 \left[\int_0^a (2W - 1)^2 dx + \left(\frac{2\pi}{m} - u\right) + \int_0^a (1 + W)^2 dx + \right. \\ \left. + 4 \left(\frac{2\pi}{m} - u\right) + \int_0^a (2 - W)^2 dx + \left(\frac{2\pi}{m} - u\right) \right].$$

Произведя упрощения, придем к более простому выражению:

$$\pi I_A^2 = I_g^2 \left[6 \left(\frac{2\pi}{m} - u\right) + \int_0^a dx - \int_0^a (W - W^2) dx \right]$$

и наконец:

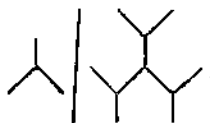
$$I_A = I_g \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{m}} \sqrt{2 - m\psi(u)}.$$

Так как $m = 6$, то:

$$I_A = I_g \sqrt{2} \sqrt{1 - 3\psi(u)}.$$

Таким образом ток в линии оказывается в $\sqrt{3}$ раз больше, чем ток в первичных обмотках, откуда следует, что в первичных токах отсутствуют гармоники 3-я, 9-я и вообще трехкратной частоты по отношению к частоте питающего тока. Кажущаяся мощность, на которую должны рассчитываться обмотки трансформатора, могут быть определены по эффективным значениям соответствующих напряжений и токов.

Так, для рассматриваемой нами схемы



киловольт-амперы

крайних обмоток равны:

$$P_{2\text{кр}} = 6E_{2\text{кр}} I_{a\text{эф}},$$

но

$$E_{2\text{кр}} = \frac{E_2}{\sqrt{3}} = \frac{V_g}{\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{m} \frac{m}{\pi} \cos^2 \frac{u}{2}} = \frac{\sqrt{2} V_g \pi}{6 \cos^2 \frac{u}{2}}$$

и

$$I_{a\text{эф}} = \frac{I_g}{\sqrt{6}} \sqrt{1 - 6\psi(u)}$$

следовательно

$$P_{2\text{кр}} = \frac{\pi}{3} \frac{\sqrt{1 - 6\psi(u)}}{\cos^2 \frac{u}{2}} P_g$$

Таким же путем для кажущейся мощности средних обмоток получим

$$P_{2\text{ср}} = \frac{3}{\sqrt{2}} E_{2\text{кр}} I_{2\text{ср}} = \frac{\sqrt{2}\pi}{6} \frac{\sqrt{1 - 3\psi(u)}}{\cos^2 \frac{u}{2}} P_g$$

Наконец мощность первичных обмоток или мощность, подводимая к трансформатору

$$P_1 = 3E_1 I_{1\text{эф}} = \frac{\pi}{3} \frac{\sqrt{1 - 3\psi(u)}}{\cos^2 \frac{u}{2}} P_g$$

Если только-что найденные выражения для кажущихся мощностей отнесем к мощности выпрямленного тока, то получим более удобные для практических расчетов коэффициенты увеличения мощностей обмоток трансформатора. Они будут следующие:

для крайних вторичных обмоток

$$k''_{\text{кр}} = \frac{P_{2\text{кр}}}{P_g} = \frac{\pi}{3} \frac{\sqrt{1 - 6\psi(u)}}{\cos^2 \frac{u}{2}};$$

средних

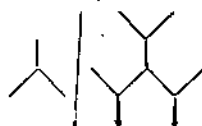
$$k''_{\text{ср}} = \frac{P_{2\text{ср}}}{P_g} = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} \frac{\sqrt{1 - 3\psi(u)}}{\cos^2 \frac{u}{2}};$$

первичных

$$k' = \frac{P_1}{P_g} = \frac{\pi}{3} \frac{\sqrt{1 - 3\psi(u)}}{\cos^2 \frac{u}{2}}.$$

По этим коэффициентам нетрудно определить средний коэффициент использования всего трансформатора или, что тоже самое, его относительную типовую мощность.

Наконец коэффициент мощности в сети, вызываемый работой ртутного выпрямителя, при схеме



будет очевидно величиной, обратной

коэффициенту k' , т. е.:

$$\mu = \frac{3}{\pi} \frac{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - 3\psi(\alpha)}}. \quad (220)$$

13. Схемы питания с разделительной катушкой.

Из главы II читателю уже известно, что шестифазная система выпрямления с междуфазовой катушкой работает как две параллельно соединенных трехфазных системы, у которых вторичные обмотки трансформаторов смещены на 180° , а нейтральные точки разделены катушкой.

Такое разделение одной системы на две самостоятельных трехфазных происходит при некотором критическом токе нагрузки $I_{гкр}$, составляющем примерно 2—3% номинального тока I_g .

До этого момента времени выпрямитель работает как обыкновенный шестифазный, при чем самоиндукция катушки играет такую же роль, как реактивные сопротивления со стороны трансформатора. Вследствие повышенной частоты переменной составляющей тока, проходящей через каждую половинку катушки ее индуктивное влияние сказывается очень эффективно, чем объясняется то обстоятельство, что при сравнительно небольшом токе нагрузки падение напряжения выпрямленного тока составляет около 13—15%.

Ранее нами были построены кривые выпрямленного напряжения и анодного тока при критическом напряжении без учета влияния индуктивных сопротивлений со стороны переменного тока. Посмотрим теперь, каковы будут эти кривые после критической нагрузки, $I_g > I_{гкр}$.

Построение на рис. 198 начинаем с точки a . С этого момента работают фазы e_6 и e_1 . Э. д. с. самоиндукции нечетной половинки междуфазовой катушки, т. е. той половинки, через которую проходят нечетные анодные токи i_1, i_3, i_5 (обозначим ее через $-S$), понижает напряжение всех нечетных фаз, а следовательно и первой фазы; э. д. с. четной половинки $+S$ повышает напряжение всех фаз четной звезды. Отсюда получаем для выпрямленного напряжения соотношения:

$$V_g = e_1 - S = e_6 + S,$$

откуда

$$V_g = \frac{e_1 + e_6}{2} \text{ и } S = \frac{e_1 - e_6}{2}.$$

Таким образом междуфазовая катушка выполняет как бы роль буфера между двумя обращенными звездами, компенсируя мгновенную разность в напряжениях двух горящих анодов. Или другими словами междуфазовая катушка вызывает колебания потенциалов нейтральных точек двух трехфазных систем.

В рассматриваемый нами период потенциал первой звезды примет отрицательное значение, потенциал второй звезды — положительное значение, равное $+S$.

Изменения потенциалов нейтральных точек изображены на рис. 198.

В точке b напряжение второй фазы, которое изменялось по закону $e_2 + S$, сравнялось с напряжением двух работавших фаз; она вступила в работу, и с этого момента кривая выпрямленного напряжения пойдет по кривой:

$$\frac{\frac{e_1 + e_6}{2} + e_2}{2},$$

так как токи i_a и i_b будут протекать через одну и ту же половину катушки, перекрываясь внутри трехфазной системы. Участок bc в кривой выпрямленного напряжения есть результат присутствия в анодных цепях индуктивных сопротивлений. Если бы разделяющей катушки не было, то вторая фаза могла вступить в работу гораздо позже. В точке c перекрытие внутри четной трехфазной системы

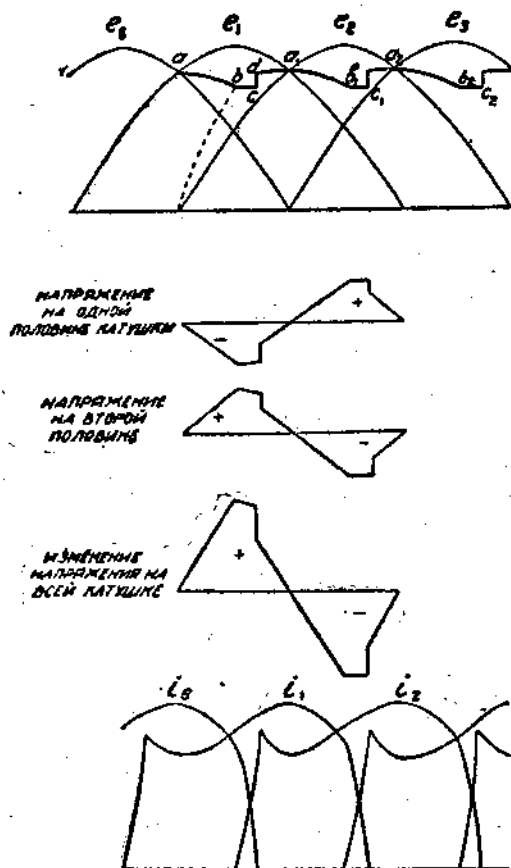


Рис. 198. Формы анодных токов, напряжения выпрямленного тока и напряжений на катушке для шестифазной выпрямительной схемы с разделительной (междуфазовой) катушкой.

перекрытие токов внутри каждой трехфазной звезды.

Верхний участок токов у нас изображен волнообразным, в виду наложения на анодные токи третьих гармонических (см. об этом в главе II), создаваемых катушкой. Если допустить, что разделяющая катушка обладает бесконечно большой самоиндукцией, то токи в верхних частях стали бы горизонтальными, совершенно похожими на анодные токи трехфазного выпрямителя.

По виду своей внешней (вольт-амперной) характеристики рассматриваемая система питания отличается от схем без разделения фаз. Эта характеристика дана на рис. 199. Мы видим, что она состоит из двух прямолинейных участков. Первый

прекращается, так как ток шестой фазы упал до нуля. После этого момента активными остаются первый и второй аноды. Их напряжения изменяются так же, как если бы каждый из них принадлежал к отдельной трехфазной системе. Однако среднее анодное напряжение пойдет по кривой da_1b_1 , равной полусумме a и b с горящих фаз. Дальнейшее течение кривой выпрямленного напряжения трудно проследить на рис. 198. Потухание второй фазы произойдет только в точке c_2 . Внизу на этой же диаграмме изображено изменение во времени формы кривых анодных токов. Мы видим, что продолжительность горения каждого анода возросла до $(120 + \alpha_2)^\circ$, где через α_2 мы обозначим угол перекрытия внутри трехфазных систем. После разделения фаз индуктивность разделяющей катушки на этот угол никакого влияния не оказывает. Вследствие присутствия катушки происходит расширение основания анодных токов на 60° в обе стороны, по 30° в каждую, что ясно из кривой напряжения на рис. 198. Таким образом катушка заставляет перекрываться анодные точки, принадлежащие разным трехфазным звездам, т. е. токи четные и нечетные, реактивное же сопротивление со стороны трансформатора вызывает взаимное пе-

участок с большим падением напряжения, около 15%, соответствует изменению нагрузки от нуля до тока критической нагрузки. В течение этого периода времени выпрямитель работает как шестифазный.

При токе критической нагрузки происходит разделение шестифазной системы на две трехфазные и напряжение выпрямителя переходит на более пологую рабочую часть характеристики с наклоном в $4-5\%$. Эффективное значение анодного тока такое же, как и у выпрямителей трехфазных, пропускающих ток, равный половине значения полного выпрямленного тока, поэтому:

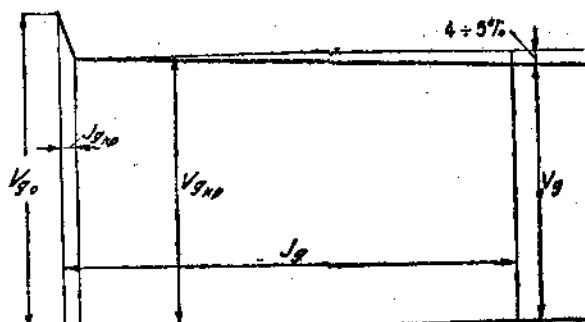


Рис. 199. Внешняя характеристика шестифазного ртутного выпрямителя, работающего в схеме с разделительной катушкой.

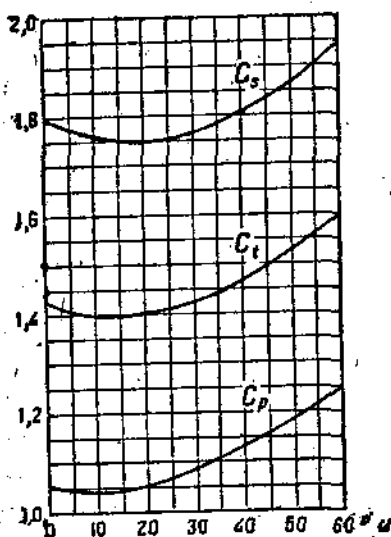


Рис. 200. Кривые, характеризующие изменение коэффициентов увеличения мощности обмоток трансформатора для схемы шестифазного выпрямления трехфазная звезда — две трехфазных звезды с разделительной катушкой в зависимости от угла перекрытия α .

k' (на рис. обозначен C_p) — для первичной обмотки,
 k'' (на рис. обозначен C_g) — для вторичной обмотки,
 k'_T (на рис. обозначен C_t) — для всего трансформатора.

$$I_{a\text{эф}} = \frac{I_g}{2\sqrt{3}} \sqrt{1 - 3\psi(\alpha)}.$$

Эффективное значение первичного тока будет:

$$I_{1\text{эф}} = \frac{I_g}{\sqrt{6}} \sqrt{1 - 3\psi(\alpha)}.$$

На рис. 200 приведены коэффициенты увеличения кажущейся мощности обмоток трансформатора.

Наконец приведем еще выражение для коэффициента мощности в линии при схемах с разделительной катушкой:

$$\mu = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \frac{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - \frac{9}{2}\psi(\alpha)}}.$$

14. Роль реактивных катушек в цепях ртутно-выпрямительных установок.

а. Анодные катушки. Наши предыдущие рассуждения в достаточной степени осветили роль реактивных катушек в анодных цепях. Мы выяснили, что подбирая соответствующим образом их коэффициент самоиндукции, можно регулировать режим работы выпрямителя, т. е. изменять число анодов, одновременно работающих в группе, величину перекрытия анодных токов, а в связи с этим и внешнюю характеристику выпрямителя. Мы приведем

также характеристики ртутного выпрямителя в зависимости от отношения $\frac{I_g}{I_{g\kappa}}$, где $I_{g\kappa}$ — ток полного короткого замыкания равный $\frac{\pi E_m}{x}$. По заданным значениям реактивного сопротивления x анодной катушки и тока нагрузки I_g , пользуясь этими кривыми, легко найти напряжение со стороны выпрямленного тока.

Хотя выведенные нами формулы только приближенные, так как получены в предположении наличия бесконечно большой самоиндукции в цепи выпрямленного тока, но для практических целей в большинстве случаев они оказываются вполне пригодными.

В эксплуатационной практике реактивные анодные катушки находят себе применение для осуществления параллельной работы выпрямителей, приключенных к одному трансформатору, а также при зарядке аккумуляторных батарей.

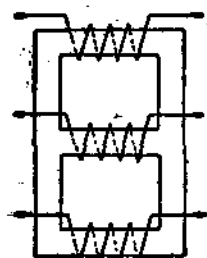
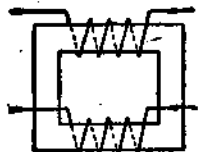


Рис. 201. Схемы включения анодных реактивных катушек для двухфазного и трехфазного выпрямителей.

Если же выпрямители приключены к отдельным трансформаторам, то достижение параллельной работы их, как между собой, так и с другими преобразователями переменного тока в постоянный, вполне осуществимо только при помощи правильного подбора реактивного сопротивления рассеяния питающих трансформаторов, что значительно проще и дешевле.

Напомним еще об одном случае применения анодных катушек, а именно, в цепи трансформаторов возбуждения, где однако их действие тоже может быть заменено повышенным рассеянием трансформатора возбуждения. На рис. 201 приведены схемы включения анодных катушек для двухфазного и трехфазного выпрямителей.

Наконец следует обратить внимание на то обстоятельство, что во всех формулах настоящей главы IV имелось в виду разделенные в магнитном отношении катушки, — если же катушки помещены на кернах, магнитно связанных между собой, то следует учесть еще их взаимную индукцию.

в. Катушка самоиндукции в цепи выпрямленного тока.

Главная задача катодной катушки сглаживать пульсацию выпрямленного тока, однако она может быть применена и для достижения устойчивой параллельной работы ртутных выпрямителей. В такой роли катодная катушка встречается в ртутно-выпрямительных устройствах со стеклянными колбами, питающих ламповые радиостанции. Одно очень важное обстоятельство заставляет отказаться здесь от анодных катушек. Дело в том, что катушка в цепи выпрямленного тока не может создать перекрытия анодных токов, так как она не в состоянии изменить разности потенциалов между анодами. Поэтому ее присутствие мало сказывается на падении напряжения выпрямленного тока; ламповые же передатчики требуют именно возможно лучшего постоянства напряжения постоянного тока. Мало того, катушка в цепи выпрямленного тока способна даже немного уменьшать падение напряжения со стороны выпрямленного тока. Объяснить это можно тем обстоятельством, что катушка видоизменяет форму анодных токов, делая их кривые более горизонтальными в верхней части; на протяжении же горизонтальных участков не будут проявлять своего влияния реактивные сопротивления в обмотках трансформатора.

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА.

Стеклоанодные ртутные выпрямители очень просты по конструкции, дешевы, не требуют почти никакого ухода, но вместе с тем хрупкость и непрочность стекла, особенно при быстро меняющихся температурных условиях, затрудняют производство и эксплуатацию ртутных колб на большие силы тока, порядка нескольких сот ампер.

Это обстоятельство заставило конструкторов для повышения мощности выпрямителей заменить стекло металлом: железом и сталью.

Первые шаги в этом направлении были сделаны в Америке. Еще в 1903 г. изобретателем стеклоанодного ртутного выпрямителя Купером Юнттом была разработана конструкция выпрямителя в железном сосуде; однако попытки американских фирм GEC и WEC строить железные выпрямители не привели к успешным результатам и были оставлены.

Независимо от Америки в Германии разработкой этого вопроса занялся инженер Шеффер (B. Scheffer), который после долгой и упорной работы, благодаря большому содействию фирмы BBC, построил в 1911 г. первый металлический выпрямитель промышленного типа мощностью 20 kW на 110—165 В.

В скором времени к постройке металлических выпрямителей в Германии приступила фирма AEG, а затем, несколько позже, уже во время европейской войны, стали их строить фирмы SSW и Bergmann.

Таким образом родиной металлических ртутных выпрямителей надо считать Германию.

Только в последние годы их строительство было развернуто и в Америке указанными выше фирмами.

В течение нескольких лет основные трудности в конструировании выпрямителей в металлических сосудах были преодолены, спрос на них быстро увеличивался во всех областях применения постоянного тока, особенно же для целей электрической тяги, что еще более способствовало их совершенствованию. Сейчас уже имеются агрегаты на несколько тысяч ампер, выполненные фирмами BBC, AEG и другими. Один из таких очень мощных агрегатов с 24 анодами, построенный фирмой AEG, показан на стр. 291.

Наконец в 1924 г. были начаты соответствующие опыты и разработка конструкций металлических выпрямителей в СССР на Ленинградском заводе „Электросила“ под руководством инженера В. К. Крапивина.

Базируясь на имевшихся к тому времени достижениях западной техники в области постройки мощных выпрямителей и на своих собственных изысканиях, завод создал к настоящему времени два типа выпрямителей на 500 и 1 000 ампер выпрямленного тока и разрабатывает еще более мощный тип.

Выпрямители завода „Электросила“ (ВЭО) установлены в настоящее время в СССР на многих подстанциях трамвайного типа и пригородного сообщения и по своим качествам не уступают заграничным.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ УСТАНОВКИ С РТУТНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОСУДАХ.

Стеклянный ртутный выпрямитель послужил тем прототипом, по которому строились первые выпрямители в металлических сосудах. На рис. 202 изображен один из таких выпрямителей наиболее ранней постройки.



Рис. 202. Общий вид металлического выпрямителя устаревшей первоначальной конструкции.

Хрупкий стеклянный баллон заменен герметически закрытым резервуаром (вакуумным сосудом) из листового железа или стали. По форме своей он очень близок к колбе стеклянного выпрямителя. С течением времени, по мере развития постройки выпрямителей, конструкция их и внешняя форма совершенно изменилась.

В схематичном виде основные элементы современной установки с металлическим выпрямителем изображены на рис. 203.

На этой схеме вакуумный сосуд, внутри которого происходят горение дуги и процессы, связанные с прохождением электрического тока через пары ртути, имеет цилиндрическую форму. Такой формы придерживаются фирмы SSW и Bergmann. У фирмы Brown-Boveri вакуумный сосуд состоит из двух цилиндров: нижнего рабочего и верхнего более узкого, в котором конденсируются пары ртути и который поэтому носит название конденсационной камеры (рис. 204).

Наконец у выпрямителей советского производства, завода „Электросила“ (ВЭО)¹ сосуд имеет конусообразную форму, в виде выпуклой чечевицы, с конденсационной камерой наверху² и сильно развитыми цилиндрами, в которые помещаются аноды (рис. 205).

Такого же вида, но без конденсационной камеры сосуда выпрямителей, изготавливаемые фирмой AEG и GEC.

Таким образом в настоящее время существует два основных типа вакуумных сосудов — в виде цилиндра и в виде чечевицы; как тот так и другой тип может быть с конденсационной камерой и без нее. Это в известной степени, как увидим из дальнейшего изложения, отражается на конструкции всего выпрямителя.

В то время как у стеклянных выпрямителей применяется воздушное охлаждение, естественное или искусственное, металлические выпрямители выполняются только с водяным охлаждением, для чего вакуумный сосуд окружается металлическим кожухом, сделанным из листового железа.

¹ Всесоюзное Электротехническое Объединение.

² Выпрямители до 500 А строятся „Электросилой“ без конденсационной камеры.

К нижней части вакуумного сосуда присоединяется катодная чашка, изолированная обычно от сосуда фарфоровым изолятором. В эту чашку наливается ртуть, и от нее отводится кабель, который присоединяется к положительному зажиму внешней нагрузки (рис. 203).

В крышке же вакуумного сосуда сделаны отверстия для ввода главных анодов, присоединяемых ко вторичным зажимам анодного трансформатора, средняя нулевая точка которого подключается к отрицательному зажиму внешней цепи.

Аноды изготавливаются из железа или графита, их вводы изолируются от крышки, места же соединений между поверхностями металлов и изоляторов должны быть непроницаемы для наружного воздуха, поэтому каждым заводом, занимающимся производством выпрямителей, разработана собственная система воздушных уплотнений. Самые простые из них, применяемые фирмой SSW, состоят из резиновых шайб, прокладываемых между соединяемыми поверхностями; с остальными типами уплотнений мы познакомимся ниже.

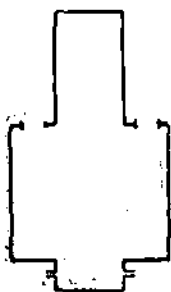


Рис. 204. Форма вакуумного сосуда выпрямителей фирмы ВВС.

Аноды обычно окружаются металлическими цилиндрами (анодными манжетами), предупреждающими возможность „перескока“ и соприкосновения ртутной дуги с холодными стенками вакуумного сосуда.

Зажигание дуги металлических выпрямителей осуществляется по тому же принципу, что и стеклянных, а именно контактным способом. С этой целью внутри сосуда помещен длинный металлический стержень, к нижнему концу которого прикреплен железный или графитовый анод зажигания, верхний же конец присоединяется к железному якорю с пружиной. Якорь помещен

внутри соленоида, а пружина отрегулирована таким образом, что анод зажигания находится на высоте 10—20 мм от поверхности ртути. Перед пуском выпрямителя включается вспомогательный трансформатор (ТВ), к которому присоединен соленоид S.

Если после этого при помощи кнопки мы замкнем на короткое время цепь

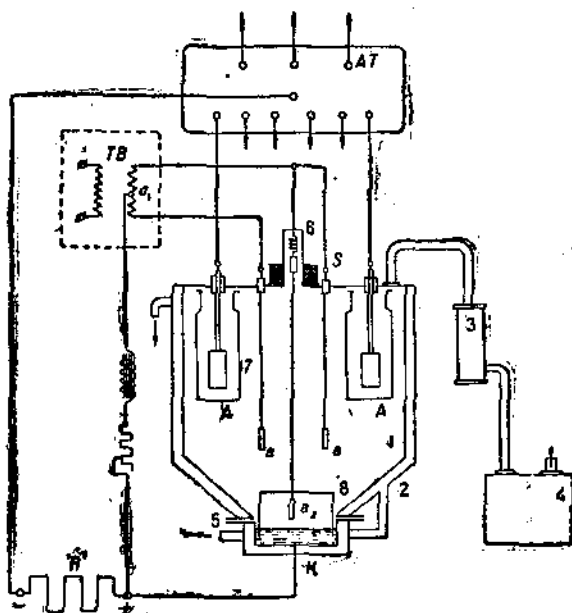


Рис. 203. Схема металлической ртутно-выпрямительной установки современной конструкции.

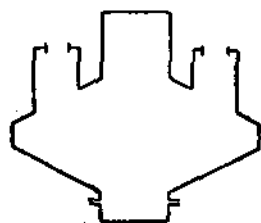


Рис. 205. Форма вакуумного сосуда выпрямителей завода „Электросила“ (ВЭО).

тока, питающего соленоид, и разомкнем ее, то анод коснется ртути и затем оттянется пружиной в прежнее положение. В цепи зажигания появится ток, при размыкании которого возникнет искра, способная активировать катод, вследствие чего зажжется дуга между катодом и добавочными анодами, подключенными к зажимам трансформатора возбуждения (ТВ). Цель устройства этих добавочных анодов, называемых анодами возбуждения или дежурного зажигания, такая же как и у стеклянных выпрямителей. Ртутная дуга может устойчиво гореть при токе не ниже некоторого минимального значения, 4—10 А, в зависимости от размеров выпрямителя. В случае уменьшения тока ниже этой величины или прекращения его хотя бы на одну стотысячную долю секунды, энергия, выделяемая на катоде, оказывается недостаточной для поддержания высокой температуры катодного пятна, и дуга гаснет.

Элементы схемы возбуждения рассчитываются таким образом, чтобы ток, идущий от катода к средней точке, был около 7—10 А.

Зажигание и возбуждение возможно устроить и на постоянном токе. В этом случае трансформатор возбуждения заменяется каким-либо источником постоянного тока, например небольшим мотор-генератором; в таком случае надобность в двух анодах возбуждения отпадает, так как один анод можно использовать и для пуска и для поддержания постоянной дуги.

Зажигание на постоянном токе делали в первое время производства металлических ртутных выпрямителей, считая его более надежным. Эксплуатационная практика показала однако, что зажигание и возбуждение на переменном токе действует вполне удовлетворительно. И так как оно проще и осуществить его автоматизацию легко, то в настоящее время предпочитают пользоваться для пуска в ход выпрямителей переменным током.

Наконец существенное значение для железных выпрямителей имеет вопрос о достижении и поддержании вакуума в сосуде.

В этом отношении между выпрямителями в металлических и стеклянных сосудах существует большое различие.

В колбах стеклянных выпрямителей, изготовленных согласно требованиям вакуумной техники, необходимый вакуум не нарушается в течение всей жизни колбы.

В металлических сосудах во время прохождения тока происходит выделение газов, окклюированных в металле, и кроме того вполне возможна течь через воздушные уплотнения даже при надежной их конструкции. Поэтому у металлических выпрямителей требуемый вакуум поддерживается непрерывной откачкой выделяемых и протекающих через щели газов. Это обстоятельство осложняет оборудование и уход за ртутно-выпрямительными устройствами с металлическими сосудами, так как требует установки вакуумных насосов и приборов для измерения вакуума.

В современных выпрямительных установках для откачки применяются два насоса; один из них ртутный конденсационный, второй масляный вращающийся, типа Геде, с электромоторным приводом. Первый из них, как насос высокого разрежения, соединяется непосредственно с вакуумным сосудом при помощи газовой трубы. Он обычно работает непрерывно и его размеры рассчитаны таким образом, что он поддерживает разрежение внутри сосуда в требуемых пределах. Но этот насос, как известно, не в состоянии производить откачку непосредственно в атмосферу, а может откачивать только в пространство с давлением, порядок которого не выше одного или нескольких миллиметров ртутного столба. Для создания такого предварительного разрежения (форвакуума) к выходной трубке конденсационного насоса присоединяется упомяну-

тый выше вращающийся насос, который выбрасывает в атмосферу газы, откачиваемые ртутным насосом.

Устойчивой и вполне надежной работы ртутного выпрямителя большой мощности можно достигнуть при давлении газов, остающихся внутри вакуумного сосуда, в пределах от 1 до 10μ ($10^{-3} + 10^{-2}$ мм ртутного столба).

Ознакомившись в общих чертах с устройством ртутно-выпрямительных установок большой мощности, перейдем к рассмотрению выпрямителей ВЭО, строящихся на Ленинградском заводе „Электросила“, останавливаясь более подробно на отдельных наиболее важных их элементах.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

ОБРАТНЫЕ ЗАЖИГАНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОСУДАХ РТУТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕРЫ БОРЬБЫ С НИМИ.

1. Особенности работы металлических ртутных выпрямителей с точки зрения обратного зажигания.

Затруднения, связанные с постройкой металлических выпрямителей, обуславливаются одним очень неприятным их свойством — обратным зажиганием, при котором происходит прекращение вентильного действия выпрямителя и короткое замыкание между анодами внутри вакуумного сосуда. Обратное зажигание ограничивает анодное напряжение ртутного выпрямителя и при неудачной конструкции делает его работу очень ненадежной. В этом отношении металлические выпрямители находятся в более неблагоприятных условиях, чем стеклянные. Потребовалось продолжительное время для подробного изучения причин, вызывающих обратное зажигание, с целью успешной борьбы с ними.

Этим объясняется значительное запоздание в появлении промышленного типа металлического выпрямителя, не менее надежного в эксплуатации, чем вращающийся преобразователь. Борьба с указанным врагом ртутных выпрямителей является главной задачей конструкторов их.

Природа обратных зажиганий достаточно подробно выяснена в соответствующей главе при рассмотрении стеклянных выпрямителей. Мы вкратце только напомним те явления, которые приводят к обратным зажиганиям.

Ртутный выпрямитель не является совершенным вентилем. В течение части полупериода, когда к железному (или графитовому) аноду приложено отрицательное напряжение трансформатора, через выпрямитель проходит обратный ток, называемый током тихого разряда.

Он вызывается потоком положительных ионов, стремящихся к железному электроду и выбивающих из него электроны, которые направляются к ртутному электроду.

В нормальных условиях этот ток очень невелик, порядка одного или нескольких миллиампер. Однако внутри вакуумного сосуда могут создаться условия, способствующие возрастанию обратного тока до такой критической величины, при которой тихий разряд быстро переходит в дуговой, сопровождающийся коротким замыканием между анодами.

Такому возрастанию тока тихого разряда до опасной величины способствует повышение среднего давления как паров ртути, так и посторонних газов внутри выпрямителя. При этом плотность тока тихого разряда настолько возрастает, вследствие сужения пути его у поверхности анода, что появляется светлое катодное пятно на анодах, служащее источником электронов. К такому

же результату приводит и чрезмерно большая плотность вентильного тока у анодов, когда поток положительных ионов образует положительные пространственные заряды с градиентом потенциала, достигающим до миллиона вольт на миллиметр.

Среднее давление паров ртути зависит от их температуры, которая в свою очередь является функцией тока нагрузки и интенсивности охлаждения вакуумного сосуда.

Согласно исследованиям Гюнтершульце в нормальных условиях работы стеклянного ртутного выпрямителя среднее давление ртутного пара внутри колбы равно 0,1 — 0,2 мм ртутного столба.

Давление посторонних газов, измеряемое при помощи вакуумметров, определяется работой вакуумных насосов, степенью непроницаемости соединительных швов, обработкой материала сосуда, анода и других металлических частей, чистой ртутью катода. Нормально оно лежит в пределах от 1 до 10 р.

Для тока тихого разряда очень опасным является не только общее ухудшение вакуума в сосуде, но и местные резкие повышения плотности ртутных паров и газов у поверхности вакуумного сосуда и железных анодов. Это может быть вызвано разными причинами, например бурным испарением капельки ртути, случайно попавшей на раскаленный до-красна анод или загрязнением поверхности анодов окислами щелочных металлов. При чистых электродах ток тихого разряда появляется при напряжении на нем около 500 вольт, в случае загрязнения анодов окислами металлов обратный ток возможен при более низком анодном напряжении (230 вольт).

Местное ухудшение вакуума может происходить в области катода при не рациональной его конструкции.

В самом деле, кислород, проникающий внутрь сосуда сквозь щели воздушных уплотнений, образует окисление поверхности железных анодов, раскаляющихся до-красна во время работы. Кроме того водород и окись углерода, выделяющиеся из металлических стенок, вступают в реакцию со ртутью, образуя между прочим цианнстые соединения. Получающиеся таким путем химические соединения смешиваются со ртутью, образуя липкую серую порошкообразную массу (ртутную смазку), осаждающуюся на стенках вакуумного сосуда.

Если шов между железным сосудом и чашкой катода оставить совершенно открытым, без всяких защитных приспособлений, то он покроется стекающей сверху ртутной смазкой, образующей проводящий мостик. Так как разность потенциалов между сосудом и катодом составляет около 10 — 15 вольт, то по мостику пойдет ток, и мостик перегорит, выделяя газы.

Такое же соединение сосуда с катодом может создать стекающая струйками вниз ртуть и налет ртутного конденсата. Катодное пятно имеет возможность легко перескочить по этому мостику на стенки вакуумного сосуда, что вызовет быстрое местное разогревание на стенках и бурное выделение газов. К таким же неприятным последствиям может повести соприкосновение катодного пятна с металлическими стенками незащищенного катода.

Выясним теперь требования, которые должны быть выполнены при конструировании металлического выпрямителя для предотвращения обратных влияний.

2. Материалы.

Все детали ртутного выпрямителя, соприкасающиеся с вакуумом, должны быть изготовлены из материалов, которые не выделяют бы посторонних газов в количествах, могущих нарушить работу выпрямителя. Поэтому такие метал-

лические части, как электроды, их вводы, флянцы, изготовляются из ковального железа, так как в отливках часто встречаются раковины, из которых всегда можно ожидать выделения посторонних газов.

Прекрасным материалом для анодов служит графит. Этот материал обладает большой лучеиспускательной способностью, высокой температурой плавления, легко выделяет газы при формовке, сравнительно мало распыляется. Однако графит должен быть очень хорошего качества, в противном случае графитовые аноды могут оказаться хуже железных, поэтому некоторые заводы, в частности и завод „Электросила“, остаются при железных электродах. В последнее время за границей и на заводе „Электросила“ производят опыты по применению для электродов специальных сортов стали, обрабатываемых особыми методами.

Наиболее надежными с вышеуказанной точки зрения изоляторами надо считать фарфоровые, тщательно обработанные и без трещин. Попытка применять более дешевые изоляторы, как например бакелитовые, окончились неудачно.

Края резиновых или асбестовых шайб с внутренней стороны вакуумного сосуда защищаются от выделения газов металлическими кольцами или ободками.

Особенное внимание следует уделять очистке ртути катода, так как малейшие примеси посторонних веществ оказывают очень вредное влияние на устойчивое горение дуги и легко приводят к коротким замыканиям в выпрямителе.

3. Охлаждение.

Поддержание нормального давления паров ртути, как мы уже указывали, имеет существеннейшее значение для бесперебойной работы ртутного выпрямителя.

Поэтому поверхность охлаждения и количество необходимой воды рассчитываются таким образом, чтобы тепло, выделяющееся при горении дуги, отводилось при температуре внутри вакуумного сосуда, соответствующей наиболее благоприятному давлению ртутных паров (0,1 — 0,2 мм ртутного столба); с повышением температуры внутри выпрямителя сверх определенной величины увеличивается соответственно давление паров ртути и вместе с этим возрастает опасность обратных зажигания.

На основании эксплуатационных данных можно сказать, что металлический выпрямитель надежно работает при температуре корпуса от 25 до 50° и расходе охлаждающей воды 0,7 литра в час на каждые 100 ампер выпрямленного тока.

Увеличение поверхности конденсации достигается некоторыми заводами устройством особой конденсационной камеры в верхней части вакуумного сосуда, куда непосредственно устремляются ртутные пары. Подобную камеру имеют выпрямители ВЭО, кроме 500-амперных, а также выпрямители фирмы ВВС. У выпрямителей ВЭО кроме того водой охлаждаются анодные рукава, и поверхности которых конденсируются ртутные пары, проникающие в пространство между защитными цилиндрами и рукавами.

Охлаждение катода должно быть особенно интенсивным, так как ртуть с поверхности катода испаряется в гораздо большем количестве, чем это необходимо для рабочего процесса.

4. Катод и его защита.

Мы выяснили, что область катода очень опасна в отношении возникновения обратных зажигания. Понятно, поэтому стремление конструкторов устранить здесь возможность возникновения явлений, вызывающих нарушение работы

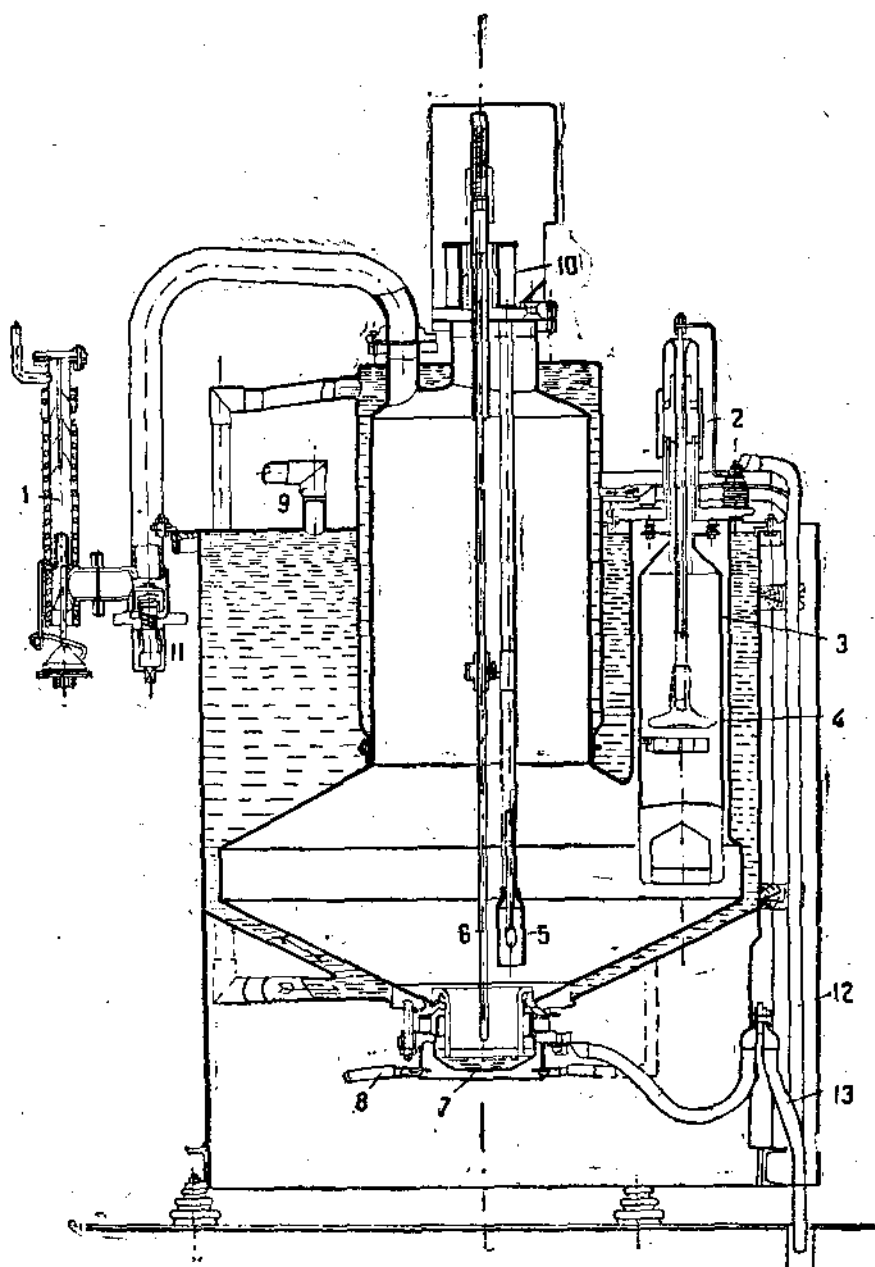


Рис. 206. Разрез ртутного металлического выпрямителя завода „Электросила“ ВЭО.

1. Насос высокого разрежения. 2. Ввод анода. 3. Защитный анодный цилиндр. 4. Электрод (анод). 5. Анод возбуждения. 6. Анод зажигания. 7. Катод. 8. Трубка для подвода воды. 9. Выход воды. 10. Втягивающий солиноид. 11. Вакуумный кран. 12. Кабель от трансформатора. 13. Кабели, идущий от катода к положительной шине.

выпрямителя, а именно: покрытия изоляции катода ртутным конденсатом или ртутной смазкой, „прилипания“ пятна к металлическим стенкам катода, перескока его на стенки вакуумного сосуда.

Обычно для устранения указанных выше явлений применяется цилиндр, сделанный из изолирующего огнеупорного материала, напр. фарфора, шамота, кварца.

Он помещается внутри катодной чашки. Кроме того у каждой фирмы имеются свои особенности в конструкции катода, которые ниже будут рассмотрены.

Примером рациональной и простой защиты катода может служить выполнение ее у выпрямителей ВЭО, которое описано на стр. 279.

5. Аноды и защита путей дуги между анодом и катодом.

В современных конструкциях мощных ртутных выпрямителей на аноды надеваются защитные металлические цилиндры, изолируемые электрически от анодов и вакуумного сосуда. Устройство таких цилиндров у выпрямителей ВЭО, показано на рис. 206.

Роль их сводится к следующему:

1) анод защищается ими от освещения ультра-фиолетовыми лучами катода;
2) затрудняется непосредственный доступ паров ртути к анодам и их вводам;

3) исключается возможность попадания на аноды капелек, сконденсировавшихся в верхних частях выпрямителя, ртутных паров.

В начальный период постройки выпрямителей некоторые заводы делали попытки окружать аноды цилиндрами из фарфора, шамота, даже стекла; однако такие экраны не выдерживали температурных условий, существующих внутри выпрямителя, лопались и совершенно разрушались.

Металлические цилиндры оказались во всех отношениях более надежными, при условии хорошей их изоляции от корпуса.

6. Формовка выпрямителя.

Перед отправкой выпрямителя заказчику завод производит „формовку“ его. Операция эта состоит в том, что в течение нескольких дней выпрямитель нагружают током при пониженном напряжении. Аноды и стенки вакуумного сосуда разогреваются, и все окклюдированные в стенках и других элементах внутри вакуумного сосуда газы выделяются под вакуумом. Для этой цели на заводах имеются особые формовочные трансформаторы и нагрузочные сопротивления. Обычно применяют водяные реостаты. В последнее время на заводе „Электросила“ вакуумный сосуд прогревается паром без нагрузки током анодов.

Такую же точно формовку необходимо производить в течение одного-двух дней после произведенного ремонта выпрямителя, связанного со вскрытием вакуумного сосуда, так как даже кратковременного прерывания вакуумного сосуда под атмосферным давлением достаточно для того, чтобы значительное количество атмосферного воздуха снова внедрилось в элементы корпуса выпрямителя.

В случае отсутствия формовочного трансформатора формовка может быть произведена поанодно под нормальным напряжением питающего трансформатора.

ВЫПРЯМИТЕЛИ ЗАВОДА „ЭЛЕКТРОСИЛА“ (ВЭО).

1. Типы выпрямителей.

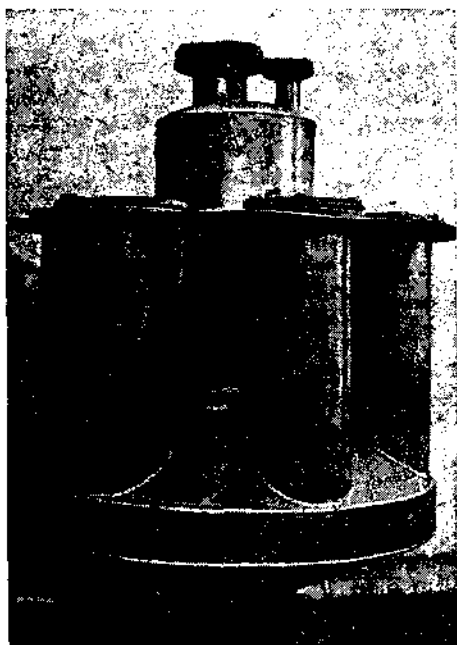
Завод „Электросила“ в настоящее время выпускает 2 типа выпрямителей: РВ5 на 500 ампер выпрямленного тока и 600 вольт, РВ10 на 1000 ампер, и разрабатывается еще третий тип РВ16 на 1600 ампер. Как напряжение, так и сила тока для каждого типа могут меняться в известных пределах, согласно кривым, которые будут приведены ниже, на стр. 315.

Отдельные элементы каждого типа, как например электроды, вакуумный сосуд, рассчитываются на ту максимальную силу тока, на которую может длительно работать данный тип; поэтому выпрямители разных типов различаются главным образом своими габаритами, в конструктивном же отношении они схожи между собой.

Разрез выпрямителя „Электросила“ РВ 10 приведен на рис. 206. Рассмотрим его устройство по частям.

2. Вакуумный сосуд.

Вакуумный сосуд или корпус выпрямителей ВЭО указанного типа изготовляется из листового железа специального сорта и состоит из следующих наи-



более важных частей: средней части в виде выпуклой чечевицы, верхнего цилиндра и анодных цилиндров (рукавов). На рис. 207 отчетливо видны перечисленные элементы. В средней части происходят рабочие процессы, связанные с прохождением тока через пары ртути; эта часть сварена из двух конусов и промежуточного цилиндра.

Над шестью отверстиями (по числу главных анодов), имеющимися в верхнем конусе, расположены анодные цилиндры (рукава), внутри которых помещаются аноды.

К краям среднего отверстия приваривается верхний конденсационный цилиндр, служащий для увеличения поверхности охлаждения выпрямителя. Таким образом вакуумный сосуд выпрямителей завода „Электросила“ по идее своего устройства напоминает колбы стеклянных выпрямителей, имеющих тоже сильно развитую конденсационную камеру и анодные трубки, в которые вводятся электроды.

К верхним краям анодных цилиндров привариваются железные фланцы, служащие для крепления анодных вводов.

Верхнее отверстие конденсационной камеры закрывается крышкой, которая прикреплается болтами к фланцам камеры. Непроницаемость шва достигается

Рис. 207. Наружный вид вакуумного сосуда выпрямителя завода „Электросила“ ВЭО.

при помощи резиновой шайбы. Через эту крышку вводятся вспомогательные аноды, т. е. аноды для постоянного поддержания дежурной дуги (дуги возбуждения) и пусковой анод (анод зажигания). В ней же имеются отверстия для вакуумной трубы и смотрового окошка, дающего возможность наблюдать при помощи перископа горение дуги внутри сосуда.

3. Конструкция катода.

В то время как у стеклянного выпрямителя выполнение этой части не представляет особых затруднений, у выпрямителей в металлических сосудах разработке конструкции катода было уделено всеми фирмами много времени и труда. О причинах возникающих здесь затруднений было сказано в главе II, посвященной вопросу о мерах борьбы с обратными зажиганиями.

У выпрямителей завода „Электросила“ катодная чашка болтами присоединяется к нижнему довольно массивному флянцу 1 вакуумного сосуда (рис. 208).

Фланец 2 поддерживает цилиндр 7 из изолирующего огнеупорного материала, например фарфора или кварца. Канавка, образуемая между закраиной флянца 2 и флянцем 1, заполняется во время работы выпрямителя ртутью, которая затем стекает вниз через отверстия, сделанные в щитке, отдельными каплями без образования непрерывных струй. Разные побочные химические соединения, образующиеся внутри сосуда при высоких температурах в присутствии остаточных газов, ртути и железа, остаются на поверхности ртути в канавке и не попадают на рабочую поверхность ртути катода. Катод имеет три шва, непроницаемость которых достигается резиновыми шайбами. Днище катода отделяется от флянца 2 фарфоровым изолятором 6. Щиток 7 защищает швы, изолятор и металлические части от покрытия их ртутным конденсатом и от соприкосновения с ртутной дугой. Между двойными стенками дна катода циркулирует холодная вода, поступающая сюда непосредственно из водопровода.

Количество потребной ртути около 20 кг.

4. Охлаждение.

Сосуд выпрямителя окружен водяным кожухом, в котором циркулирует охлаждающая вода. Такая же водяная рубашка имеется и вокруг конденсационной камеры, куда устремляется во время работы главная масса ртутного пара. Циркуляция воды совершается по схеме, приведенной на рис. 209.

Проточная вода поступает в кожух катода, затем поднимается по трубе вверх. Здесь водяной поток разветвляется на две части: одна часть проходит через змеевик, помещенный в кожухе насоса, заполненном маслом, после чего выходит наружу; вторая часть воды поступает сначала в конденсационную камеру, омывает ее цилиндр, нагретый и поднимается к выходному отверстию, откуда по трубе спускается вниз и проникает в кожух выпрямителя, откуда уходит в сливную трубку.

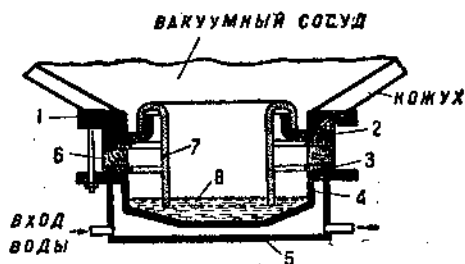


Рис. 208. Устройство катода выпрямителя завода „Электросила“ ВЭО.

Рациональность подобной системы охлаждения очевидна, так как таким путем интенсивно охлаждаются именно те элементы установки, которые в таком охлаждении наиболее нуждаются.

Б. Устройство анодов и их вводов.

Анод с его вводом представляет не менее ответственную часть выпрямителя, чем катод.

Наибольшие затруднения, которые возникали в начальной стадии развития металлических выпрямителей, были тесно связаны с осуществлением непроницаемых для наружного воздуха соединений между фланцами корпуса и изоляторами анодов и их вводами.

Почти у всех заводов анодная система является наиболее сложной частью выпрямителя. Заводом „Электросила“ были разработаны две конструкции ано-

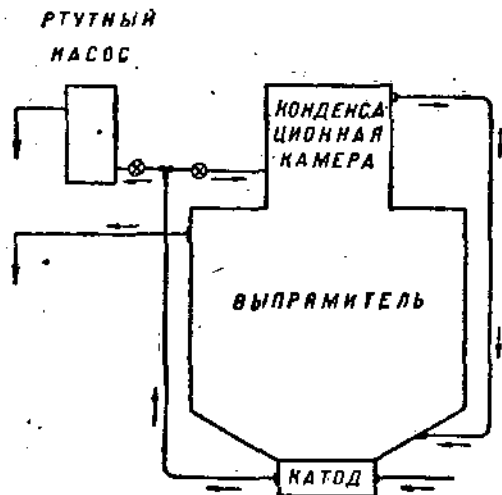


Рис. 209. Схема циркуляции охлаждающей воды у выпрямителей завода „Электросила“ ВЭО.

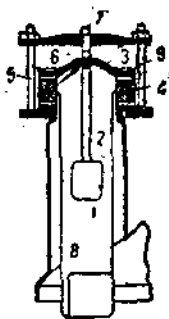


Рис. 210. Первая (старая) конструкция анодов выпрямителей завода „Электросила“ ВЭО.

дов. Скажем несколько слов о старой системе. Ее схема изображена на рис. 210. Электрод 1 навинчивался на токопроводящий стержень, приваренный к круглой плитке 3. Эта плитка опиралась на фарфоровый изолятор 4; герметичность соединений между изолятором и металлическими поверхностями достигалась при помощи резиновых шайб 5. Нажим на шайбы осуществлялся через стальной шарик 6 поворотом болта 7. Таким путем удавалось избежать перекосов плитки 3 при сборке, так как давление равномерно распределялось на уплотнениях. Путь ртутной дуги защищен железным цилиндром 8, который подвешивался на изоляторах. Электрод, стержень и плитка 3 делались из чистого кованого железа.

Для резиновых уплотнений, даже сделанных из специальных сортов резины, очень опасно чрезмерное повышение температуры; практикой установлено, что для избежания быстрого старения этого материала следует поддерживать температуру окружающих частей не выше 40°.

Поэтому для целей охлаждения по периферии плиток 3 устраивались круговые канавки 9, омываемые холодной водой. Это обстоятельство являлось недостатком такой системы анодов, кроме того при сборке требовалась особая внимательность, так как в противном случае в резиновых уплотнениях могла появиться течь.

Новейшая конструкция анодов и их вводов у выпрямителей завода „Электросила“ совершенно изменена.

Прежде всего изменен конус электродов. Раньше он делался из железа и притом полым для увеличения активной поверхности. У такого электрода при высокой температуре, особенно при перегрузках, нижний край мог легко оплавиться. Поэтому, несмотря на простоту и легкость обработки таких электродов, завод перешел к электродам, форму которых можно видеть на рис. 211. Изготавливаются они из вольфрамовой стали, вследствие чего повышается срок их службы и увеличивается допускаемая поверхностная плотность анодного тока.

Вторым усовершенствованием является конструкция вводов и воздушных уплотнений.

Ввод состоит из следующих основных элементов: токопроводящего медного стержня 2; железной трубки 3; фарфорового изолятора 4; отрезка резиновой трубки 5; защитного анодного цилиндра (манжеты).

Токопроводящий стержень для придания ему устойчивости прикрепляется к изогнутому держателю 6, к нему же присоединяется кабель от анодного трансформатора.

Гильза 3, окружающая стержень 2, сверху имеет загиб, как показано на рис. 211, внизу же к ней приваривается железный наконечник с нарезкой, на который навинчивается электрод.

Анод и ввод монтируются на анодной плитке 8, к которой приварена железная трубка, поддерживающая фарфоровый изолятор. Между краями железных трубок и поверхностью фарфора имеются алюминиевые прокладки 9.

Отрезок резиновой трубки плотно насаживается на ввод и вполне герметично закрывает швы.

Диаметр медного стержня 2 рассчитывается по силе анодного тока, при этом он может нагреваться выше температуры, опасной для резиновых уплотнений, так как резиновая трубка 5 надета на железную гильзу, которая в верхней части имеет поверхность, достаточную для того, чтобы излучать тепло, поднимающееся по гильзе снизу, и не допустить повышения температуры выше пределов, опасных для резины.

Анодная плитка привинчивается к крышке выпрямителя, при этом в качестве уплотнений для швов применяются резиновые шайбы указанного выше типа.

Следует еще заметить, что резиновые шайбы как анодных, так и катодных уплотнений с внутренней стороны защищены металлическими ободками, чем предотвращается возможность выделения газов, окклюдированных в резине, в в вакуумное пространство.

6. Зажигание и возбуждение выпрямителей ВЭО.

Схема зажигания и возбуждения приведена на рис. 212.

Трансформатор 1, подключаемый к сети местных нужд, имеет две вторичных обмотки — одна из них, со средней нулевой точкой, питает цепь воз-

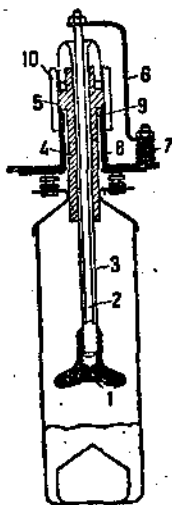


Рис. 211. Современная конструкция анодов и их вводов выпрямителей завода „Электросила“ ВЭО.

буждения, а ко второй подключен втягивающий соленоид 2 через контакты реле 5. Пуск в ход выпрямителя производится автоматически. При включении трансформатора 1 пройдет ток через соленоид 2, он заставит стержень с пусковым анодом 3 опуститься и частично погрузиться в ртуть, в этот момент катушка 2 окажется зашунтированной пружиной и стержнем, втягивающее действие соленоида ослабеет, и пружина поднимет пусковой анод. Искра при размыкании возбудит катодное пятно и между анодами 4 и ртутью зажжется дуга. Тогда от катода к средней точке трансформатора 1 пройдет ток через реле 5, которое разомкнет контакты цепи зажигания.

В момент отделения от ртути пускового анода полярность последнего может оказаться отрицательной, в таком случае зажигания дуги не произойдет, реле 5 не подействует, и поэтому снова соленоид заставит опуститься анод 3 и т. д. Такие движения пускового анода будут продолжаться до появления тока в цепи возбуждения. Обычно зажигание происходит в течение 2—3 секунд.

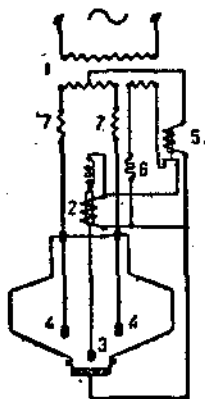


Рис. 212. Схема зажигания и возбуждения ртутных металлических выпрямителей завода „Электросила“ ВЭО.

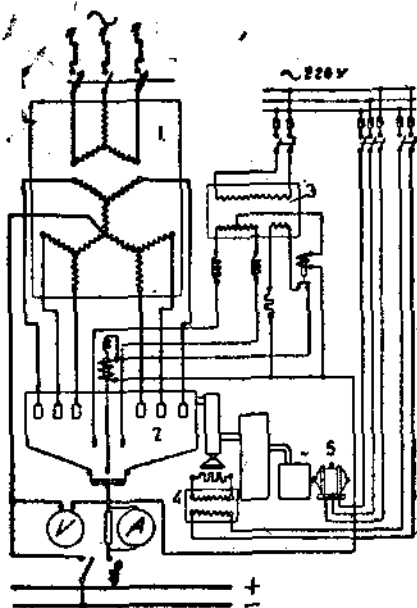


Рис. 213. Принципиальная электрическая схема ртутно-металлической выпрямительной установки завода „Электросила“ ВЭО.

Сопротивление 6 вводится для ограничения и регулирования пускового тока, идущего через соленоид. Этот ток порядка 3—5 ампер. Среднее значение выпрямленного тока в цепи возбуждения поддерживается обычно около 7—10 ампер при рабочем напряжении трансформатора 110—120 вольт (55—60 вольт между нулем и крайним зажимом).

Интересной особенностью схемы зажигания и возбуждения выпрямителей ВЭО является полное отсутствие реактивных катушек в цепи анодов и в катоде. Такие катушки обычно применяются всеми фирмами для предотвращения потухания дуги возбуждения, что могло бы произойти при переходе дуги с анода на анод.

Но даже и при трехфазной схеме возбуждения можно ожидать потухания дуги при наличии очень небольшой самоиндукции в схеме, так как быстро

передвигающееся по поверхности ртути катодное пятно может само по себе погаснуть. Энергия электромагнитного поля самоиндукции поддерживает непрерывность существования пятна.

Вместо реактивных катушек завод „Электросила“ применяет для питания цепи возбуждения трансформатор с большим рассеянием. Он рассчитывается таким образом, что перед пуском выпрямителя на его зажимах существует необходимое для зажигания дуги напряжение; после зажигания дуги возбуждения трансформатор работает при короткозамкнутом режиме, и ток его ограничивается реактивным сопротивлением рассеяния, а также потерями в меди и в дуге.

Такая схема экономичнее схемы с катушками и омическим сопротивлением в цепи тока возбуждения. Расход энергии на возбуждение у выпрямителей ВЭО составляет примерно 0,25 kW. Эта схема возбуждения, как и схемы с анодными катушками, имеет еще одно очень ценное качество: при ней безопасны короткие замыкания между анодами возбуждения, которые могут часто происходить благодаря близости анодов к катоду.

7. Схема электрических соединений ртутного выпрямителя ВЭО.

Принципиальная схема соединений представлена на рис. 213.

Первичная обмотка анодного трансформатора включена звездой, вторичная — зигзагом.

Схема возбуждения уже описана нами.

Печь сопротивления для подогрева ртути конденсационного насоса присоединяется к служебной сети через трансформатор 4. Изоляция вторичной обмотки этого трансформатора от железа первичной обмотки выполняется на напряжении, равное рабочему напряжению выпрямителя, так как насос присоединяется к корпусу выпрямителя и несет его потенциал. Более детальная схема соединений будет рассмотрена ниже.

8. Наружный вид выпрямителей ВЭО.

Общий вид ртутно-выпрямительного агрегата типа РВ10 приведен на рис 214, при этом справа дан также разрез его по АВ.

Корпус выпрямителя составляет одно целое с подставкой цилиндрической формы; в ней имеются отверстия, через которые можно проникнуть к катоду. Во время работы эти отверстия закрываются металлической сеткой.

С левой стороны выпрямителя на рисунке расположен форвакуумный агрегат, состоящий из вращающегося насоса и форвакуумного бака.

Ртутный насос высокого разряжения смонтирован у крышки выпрямителя; при помощи вакуумной трубы значительного диаметра насос соединяется через крышку конденсационной камеры с вакуумным пространством.

Впереди виден вакуумметр MacLeod'a, состоящий из стеклянного вакуумметра, опущенного в высокую цилиндрическую трубу.

На плане можно видеть, как подводятся кабели от трансформатора через особую металлическую коробку.

Мы пока не рассматривали некоторых других элементов выпрямителей ВЭО, а именно: вращающегося насоса, ртутного насоса, быстродействующего выключателя и пр. Эти элементы будут описаны ниже в соответствующих главах.

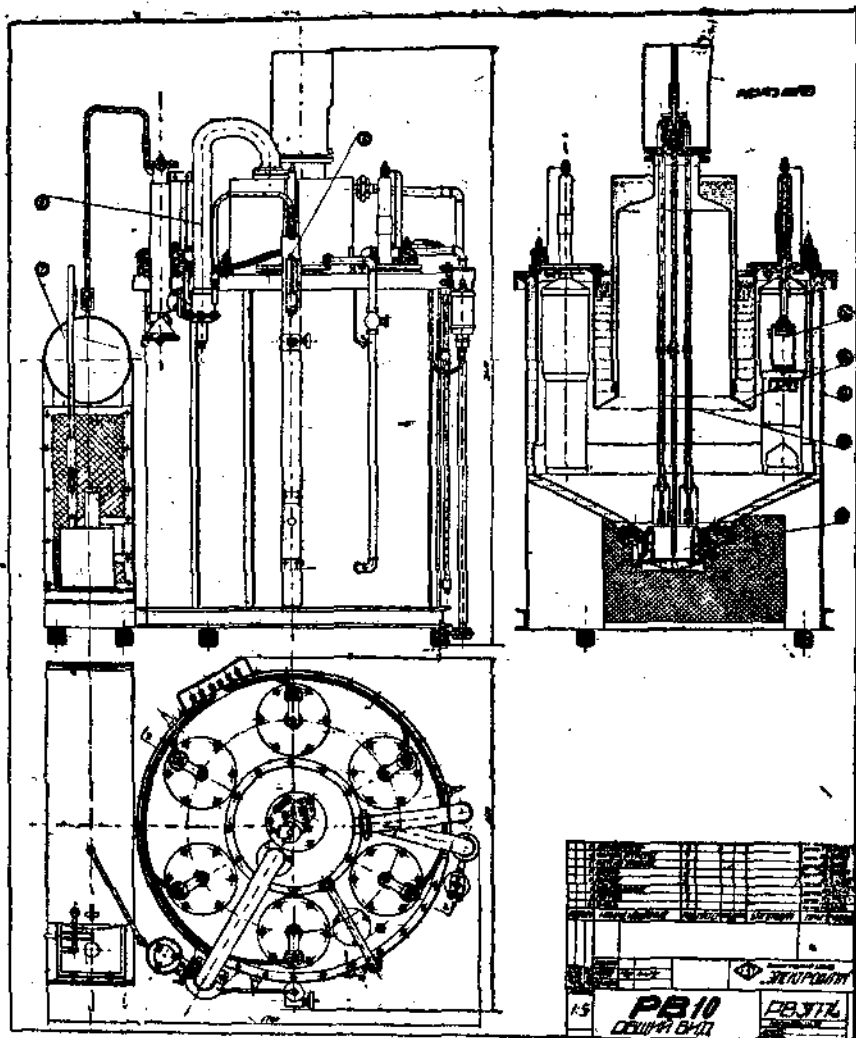


Рис. 214. Общий вид и разрез ртутно-выпрямительного металлического аппарата завода „Электросила“ ВЭО.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ НЕКОТОРЫХ ЗАГРАНИЧНЫХ ФИРМ.

1. Выпрямители фирмы BBC [Brown Boveri Company].

Выпрямители этой фирмы являются наиболее распространенными в Европе. Мощность выполненных ею установок достигает очень солидной величины — более 500 000 kW. Среди них имеется несколько автоматически действующих. В СССР, как например в Ленинграде, Москве и других местах, на трамвайных

и железнодорожных подстанциях имеются выпрямители ВВС, зарекомендовавшие себя с наилучшей стороны.

Наибольшее количество установок выполнено с напряжением 500—700 вольт, что объясняется распространением ртутных выпрямителей на подстанциях трамвайного типа. Мощность отдельных агрегатов доходит до 5000 kW. Выпрямители, дающие напряжение выпрямленного тока 1500 вольт и выше, встречаются реже и главным образом на железных дорогах пригородного и междугородного сообщения.

Наиболее мощный выпрямитель, построенный фирмой ВВС, имеет 24 анода и дает 16 000 ампер выпрямленного тока.

2. Конструкция вакуумного сосуда и катода выпрямителей ВВС.

Разрез выпрямителя фирмы ВВС представлен на рис. 215.

Во многих отношениях выпрямители этой фирмы отличаются от выпрямителей завода „Электросила“.

Прежде всего вакуумный сосуд имеет цилиндрическую форму. Сверху он покрывается анодной плитой, которая должна выдерживать давление наружного воздуха и поэтому делается из стали. На плите установлена конденсационная камера. Через отверстия, имеющиеся в плите вокруг конденсационной камеры, вводятся главные и вспомогательные электроды, изолированные от плиты фарфоровыми изоляторами. На крышке же конденсационной камеры помещен втягивающий соленоид зажигающего электрода, и укреплен вакуумная труба. Вакуумный сосуд и камера сделаны из листовой стали.

Сосуд для ртути катода состоит из фарфорового кольца и железного дна с двойными стенками, между которыми циркулирует холодная вода.

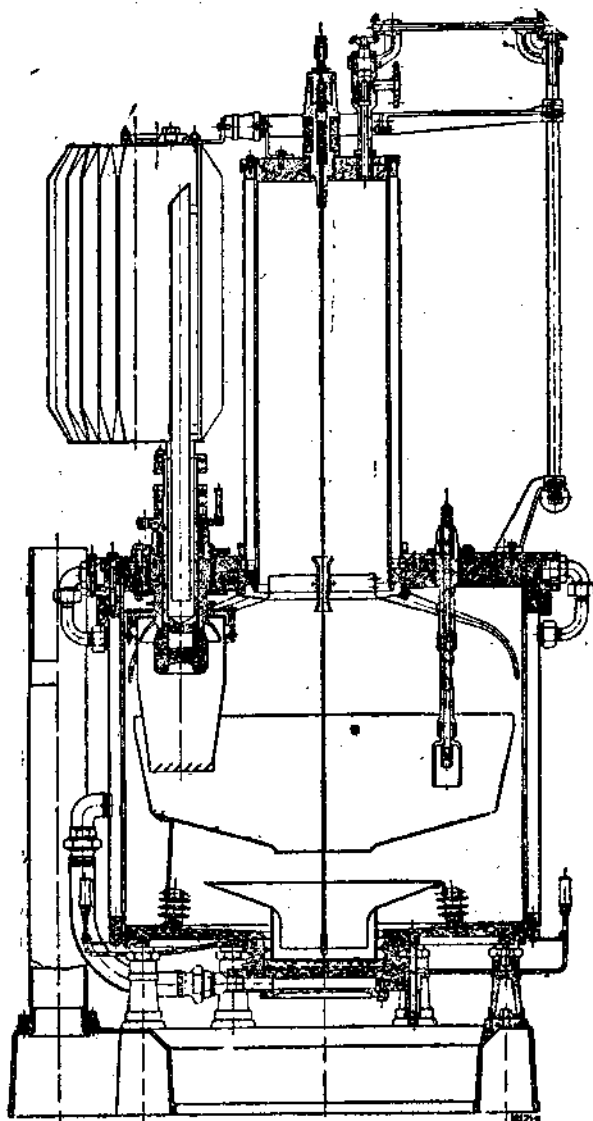


Рис. 215. Разрез металлического ртутного выпрямителя фирмы ВВС.

Катод защищается металлическим щитком, прикрепленным к фарфоровому изолятору, установленному на днище рабочего цилиндра. В средней части сосуда имеется еще один воронкообразный экран больших размеров. Благодаря такой системе металлических экранов, возможность возникновения обратных зажигания внутри вакуумного сосуда сведена до минимума.

Дуга не может перескочить на стенки рабочего цилиндра, пары же ртути, отделяясь от дуги у нижнего отверстия цилиндра, направляются вверх в конденсационную камеру и конденсируются на ее стенках.

Ртутный конденсат, стекая по стенкам камеры вниз, попадает на металлический навес, прикрепленный к нижней части анодной плиты; отсюда он спускается к стенкам сосуда и наконец по ним течет к катоду.

Аноды помещены в металлические цилиндры, снабженные снизу металлическими решетками, которые способствуют деионизации паров ртути вблизи анодов в начале отрицательных полупериодов и этим улучшают защиту от возникновения обратных зажигания. Но одновременно присутствие решеток неблагоприятно отражается на величине зажигающего потенциала, что уже указывалось ранее.

3. Аноды и система воздушных уплотнений выпрямителей ВВС.

Аноды и их вводы имеют у выпрямителей ВВС довольно сложную конструкцию (рис. 215). Положительный электрод сделан из стали, имеет совершенно гладкую отполированную поверхность и навинчивается на токопроводящую трубку. Охлаждение вводов осуществляется при помощи ребристых радиаторов, наполненных водой у выпрямителей на большую силу тока. Вводы у выпрямителей на малую силу тока имеют только воздушное охлаждение при помощи таких же радиаторов, но меньших размеров.

На нижней юбке анодного изолятора подвешивается железный защитный цилиндр. Ввод, как и у выпрямителей других систем, имеет два шва: один между изолятором и плитой, другой между вводным стержнем и изолятором. Непроницаемость швов достигается при помощи ртутных уплотнений. Схематическая система этих уплотнений изображена на рис. 216.

Круглая металлическая шайба *d* обжимает асбестовый шнур *e*. Пространство между вводом и анодной плитой *a* ва-

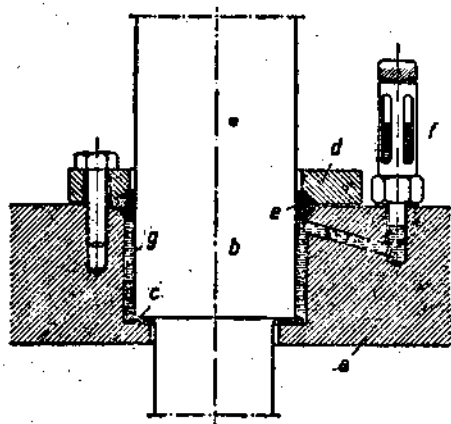


Рис. 216. Система уплотнений анодных вводов фирмы ВВС.

поливается ртутью *g*. Резиновое кольцо *c* не дает возможности ртути проникнуть внутрь вакуумного сосуда. Упомянутый асбестовый шнур предохраняет ртуть от испарения в окружающее пространство. Для наблюдения за состоянием уплотнений имеется контрольная трубка *f*. Непроницаемость для наружного воздуха уплотнений в местах присоединений крышки к рабочему цилиндру и катода к днищу осуществляется также при помощи асбеста и ртути.

4. Зажигание, возбуждение и электрическая схема выпрямителей фирмы ВВС.

Зажигание и возбуждение выпрямителей ВВС производится автоматически на переменном токе (см. схему рис. 217).

Для более устойчивого горения дуги возбуждения фирма пользуется реактивной катушкой, помещенной в катодной цепи тока возбуждения, величина же последнего регулируется омическим сопротивлением. Мощность вспомогательного трансформатора 1,4 kW, вторичное его напряжение 2×116 вольт.

В схеме имеются два реле I и II.

Когда трансформатор возбуждения включен, контакты этих реле $a-b$ и $c-d$ находятся в замкнутом положении, как это изображено на рис. 217,

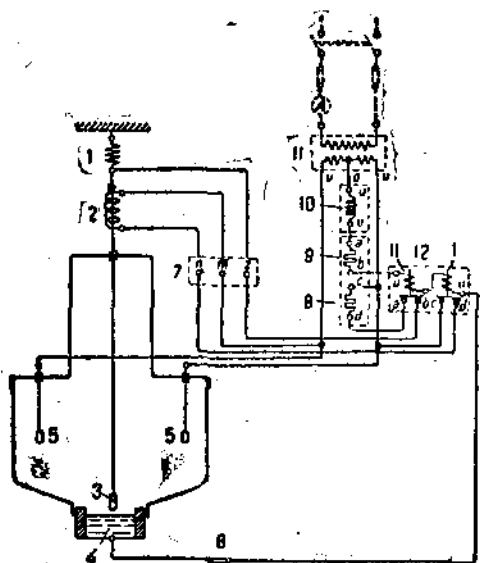


Рис. 217. Схема автоматического зажигания и возбуждения металлического ртутного выпрямительного аппарата фирмы ВВС.

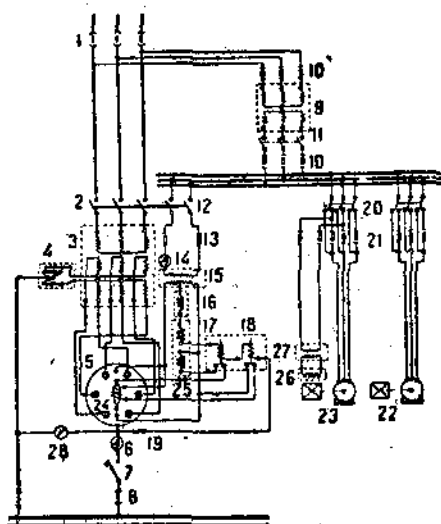


Рис. 218. Схема включения металлического ртутного выпрямителя фирмы ВВС.

при этом первое реле замыкает цепь соленоида, а второе — цепь зажигания, заключающую в себе половину вторичной обмотки трансформатора, стержень анода зажигания, ртуть катода, обмотки обоих реле, сопротивления 9 и 8 и реактивную катушку.

Как только трансформатор возбуждения будет включен, анод зажигания коснется ртути, и через реле I и II пройдет ток. Однако разомкнет свои контакты только первое реле, так как оно рассчитано на меньшую силу тока, чем реле II. Соленоид выключится, и если при этом загорится дуга на аноды возбуждения, то подействует реле II, разомкнутся контакты $a-b$, в противном же случае анод зажигания снова опустится. Продолжительность зажигания не более 3 секунд.

Сопротивлением 8 ограничивается ток зажигания.

На рис. 218 изображена нормальная схема включения ртутного выпрямителя ВВС с ручным обслуживанием для шестифазного выпрямления.

Первичная обмотка соединена звездой, вторичная же шестифазная состоит из двух трехфазных звезд, повернутых друг относительно друга на 180° и разделенных между собой междупазовой реактивной катушкой. Переменный ток с линии передачи проходит через разъединители 1, масляный выключатель 2 к первичной обмотке трансформатора 3. Выпрямленный ток катода протекает через автоматический выключатель 7, который отключает выпрямитель в случае возникновения короткого замыкания внутри вакуумного сосуда или в линии постоянного тока. Для этой цели автомат снабжен реле обратного тока и реле перегрузки.

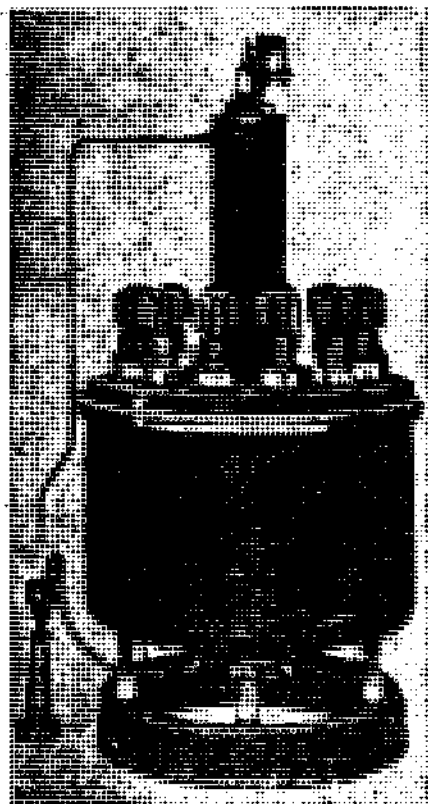


Рис. 219. Внешний вид металлического ртутного выпрямителя фирмы BBC типа GRZ 1612.

Шины местных нужд питаются от вспомогательного трансформатора 9. К этим шинам приключается трансформатор возбуждения 15, изолирующий трансформатор нагревательного элемента насоса высокого разрежения, затем электродвигатели форвакуумного насоса 23 и насоса циркуляционного охлаждения при наличии такового.

На рис. 219 показан внешний вид выпрямителя BBC типа GRZ 1612, который может быть применен для напряжений от 300 до 500 вольт при токах соответственно от 1600 до 515 ампер.

Выпрямитель свободно устанавливается на фарфоровых изоляторах, которые прикрепляются к металлическому фундаментному кольцу.

Если в помещении, предназначенном для ртутно-выпрямительной установки, не имеется подъемного механизма, то кольцо может быть по особому заказу сделано на роликах, что дает возможность легко передвигать выпрямитель. После установки агрегата на место, ролики могут быть сняты.

Общий вид установки BBC с двумя параллельно работающими выпрямителями типа GRZ 56 (о типовых мощностях выпрямителей BBC см. стр. 316) представлен на рис. 220.

Два выпрямителя имеют один общий насосный агрегат и ограждены предохранительной решеткой.

5. Выпрямители фирмы AEG [Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft].

При описании выпрямителей AEG мы будем останавливаться только на тех их особенностях, которыми они отличаются от рассмотренных уже нами выпрямителей ВЭО и BBC.

Вакуумный сосуд, как это видно на рис. 221, сваривается из трех частей: верхнего сферического сегмента, среднего цилиндра и нижнего конуса. Таким

образом он по своей форме несколько напоминает рабочий сосуд выпрямителей ВЭО типа РВ 10, однако существенное различие между ними заключается в отсутствии конденсационной камеры у выпрямителей АЕГ, у которых требуемая поверхность охлаждения достигается за счет развития поверхности корпуса выпрямителя.

С целью повышения интенсивности охлаждения холодная вода поступает сначала в верхнюю часть кожуха выпрямителя, отсюда спускается вниз, нагревается и затем снова поднимается и в средней части корпуса выходит в отводящую трубу. Конденсационный насос охлаждается отдельной струей свежей воды, которая нагревается в кожухе насоса не более чем на 5° и после этого

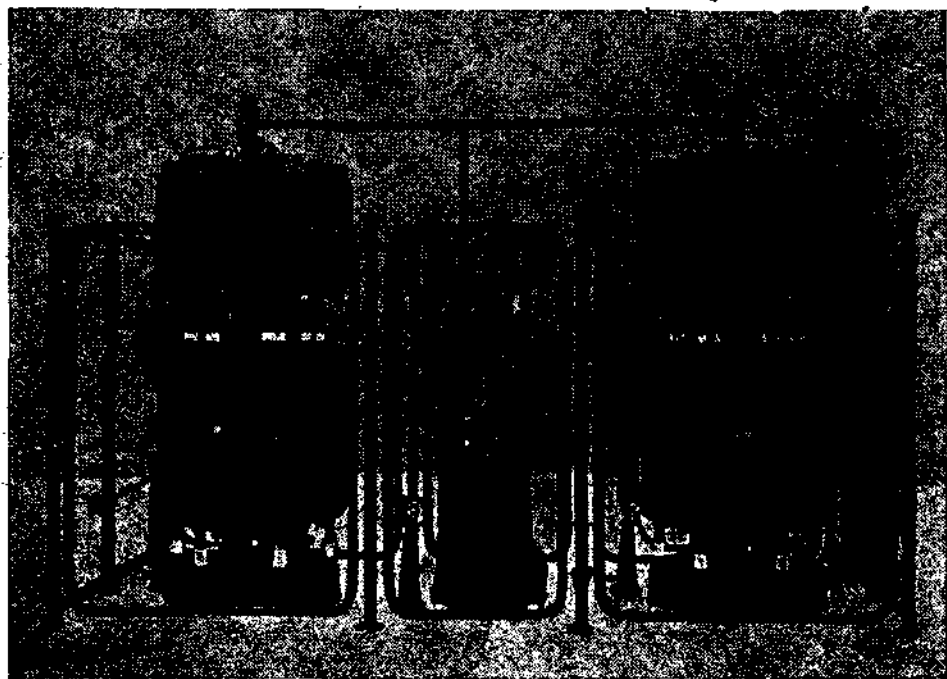


Рис. 220. Общий вид ртутно-выпрямительной установки фирмы ВВС с двумя металлическими выпрямителями типа GRZ 56.

еще направляется в водяную рубашку катода. Температура нагретой воды поддерживается не выше 38° .

Аноды вытачиваются из кованого железа и имеют форму, как показано на рис. 222, с воронкообразным углублением в головке электрода. Наружная поверхность их тщательно отполирована, а поверхность углубления сделана мелко-ребристой, чем увеличивается активная поверхность анода.

В последнее время фирмой АЕГ разработан новый тип графитовых анодов. Все элементы анодного устройства, а именно анодный ввод H , на который навинчивается электрод A , фарфоровый изолятор, воздушный ребристый радиатор K , изолирующая шайба D монтируются на особом кольце U при помощи 4 болтов.

Стальные пружины обеспечивают постоянство и равномерность давления по окружности нажимной плиты P независимо от изменения температурных условий.

Собранная таким образом анодная система составляет одно целое и в свою очередь прикрепляется болтами к фланцам анодных цилиндров корпуса посредством колец *F*.

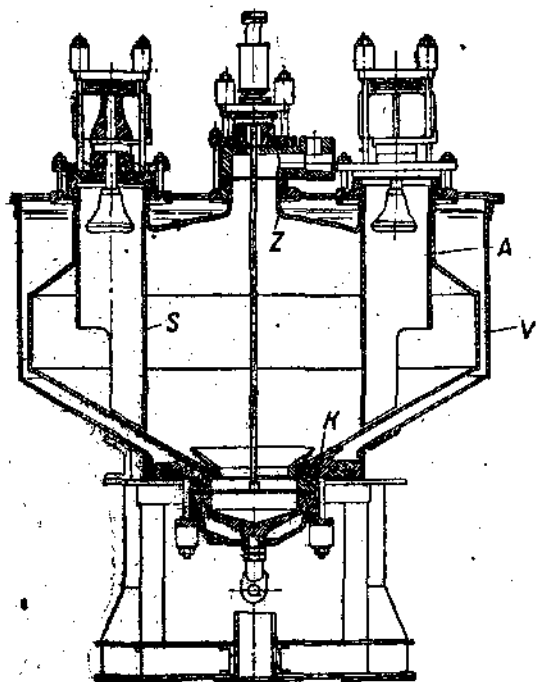


Рис. 221. Разрез ртутно-металлического выпрямителя фирмы AEG на 500 ампер.

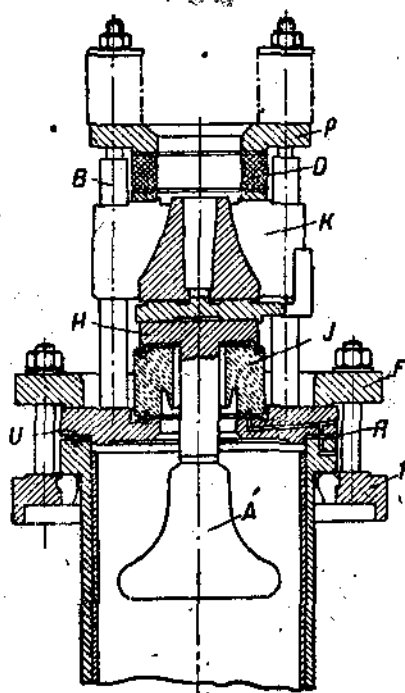


Рис. 222. Анод и устройство анодного ввода выпрямителей фирмы AEG.

Опишем еще устройство анодных уплотнений. Схема их изображена на рис. 223. Они состоят из свинцовых шайб, ограниченных с наружной и внутренней стороны алюминиевыми проволоочными кольцами. Из них внутреннее кольцо покрыто эмалью для защиты от ртути.

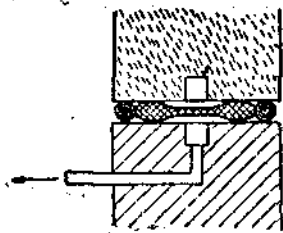


Рис. 223. Система уплотнений анодных вводов ртутно-металлических выпрямителей фирмы AEG.

Особенностью уплотнений AEG, следует считать их двухступенчатость. В самом деле, на рис. 223 мы можем заметить, что в изоляторе и фланце сделаны круговые канавки. Верхняя канавка сообщается с нижней через отверстия, имеющиеся в свинцовой шайбе. Канавки при помощи трубки соединены с фарфоровым резервуаром, поэтому в канавках поддерживается давление, равное форвакуумному, т. е. порядка одного или нескольких мм ртутного столба. Таким путем повышается надежность уплотнений, так как внутренний шов должен противостоять значительно пониженному давлению по сравнению с атмосферным.

Уплотнение места присоединения катода к фланцу корпуса осуществляется при помощи резиновых шайб, которые одновременно служат и изоляцией катода от корпуса.

О конструкции анодных защитных цилиндров можно получить представление, рассматривая разрез на рис. 221. Цилиндры плотно входят в анодные рукава корпуса, без зазоров.

Зажигание и возбуждение фирма AEG не так давно устраивала на постоянном токе. В настоящее время она перешла на пуск возбуждения при помощи переменного тока по обычной схеме.

Внешний вид выпрямителя фирмы AEG на 12 000 ампер с 24 анодами представлен на рис. 224.

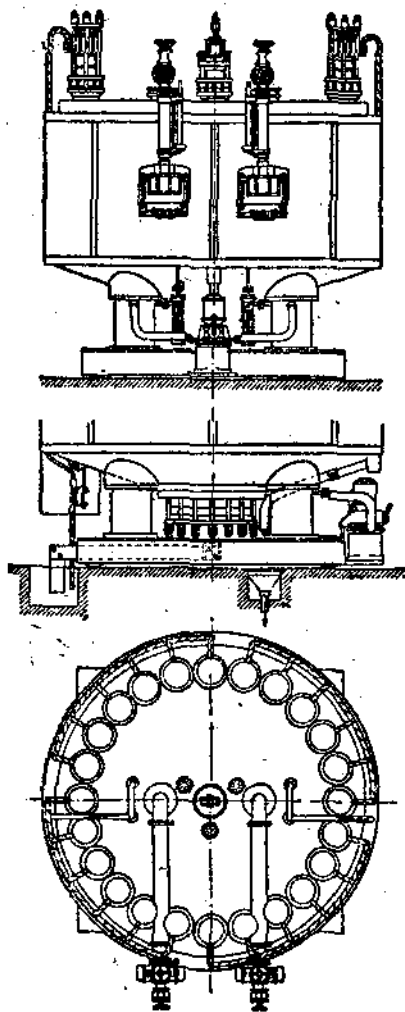


Рис. 224. Внешний вид ртутно-металлического выпрямителя фирмы AEG с 24 анодами на 12 000 ампер.

6. Выпрямители фирмы SSW [Siemens-Schuckertwerke].

Конструкция выпрямителя SSW схематически изображена на рис. 225.

Вакуумный сосуд состоит из цилиндра, конического дна и плоской крышки. Для защиты катодных швов от воздействия дуги имеется довольно высокий кварцевый цилиндр *i*. В верхней части этого цилиндра происходит отделение электронного потока от паров ртути. Пути электронов загнбаются под прямым углом по направлению к анодам, а ртутные пары поднимаются прямо вверх, затем попадают в два коаксиально расположенных над катодом цилиндра, встре-

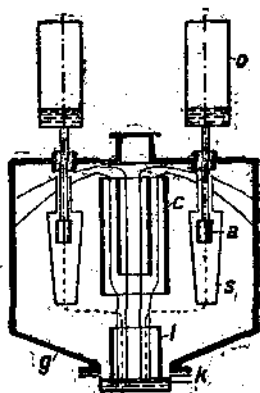


Рис. 225. Схематический разрез ртутного металлического выпрямителя фирмы SSW.

чают крышку цилиндра сосуда и наконец достигают внутренней поверхности стенок сосуда, где происходит их полная конденсация. Свежая вода последовательно охлаждает катод, конденсационный насос, нижнюю часть рабочего сосуда, среднюю его часть и затем поступает в отводящую трубку. Водяная рубашка сосуда сверху не закрывается. В крышке сделано смотровое окошко.

Водяной кожух конструктивно соединен в одно целое с подставкой, которая изолирована от земли. Наружный вид выпрямительной установки можно видеть на рис. 226.

Аноды делаются из графита или железа и защищаются железными цилиндрами. Воздухонепроницаемые уплотнения анодных вводов подобны уплотнениям выпрямителей советского производства, т. е. состоят из шайб, сделанных из резины особого качества, с малым выделением газов, и защищаемых со стороны вакуума металлическими кольцами.

Так как для резиновых уплотнений опасно повышение температуры выше 40° , то фирма SSW прибегает к интенсивному охлаждению анодных уплотнений при помощи масла, циркулирующего в ребристых радиаторах.

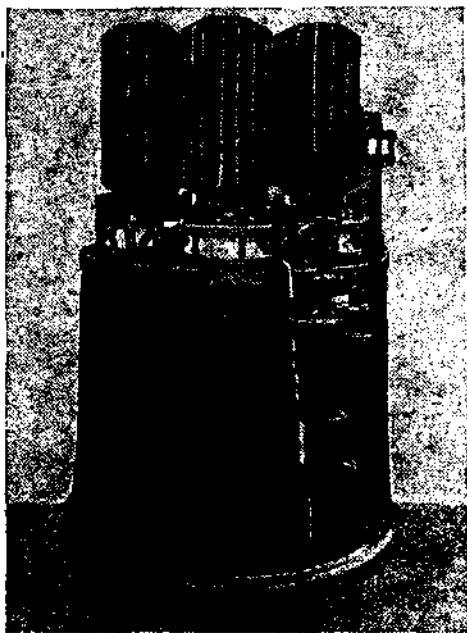


Рис. 226. Внешний вид ртутно-металлического выпрямительного аппарата на 1000 ампер фирмы SSW.

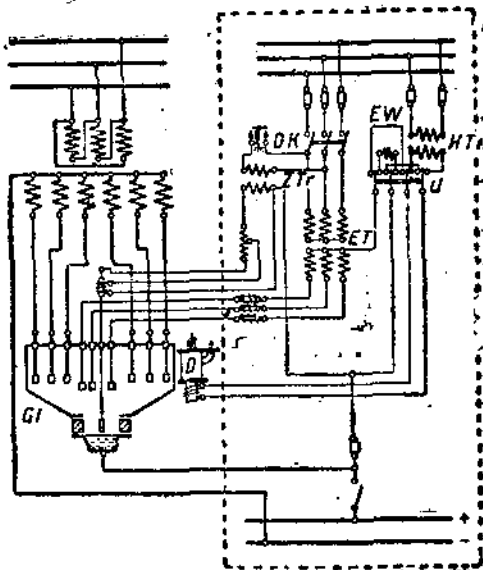


Рис. 227. Схема включения ртутно-металлических выпрямителей фирмы SSW при зажигании и возбуждении на переменном токе.

Зажигание и возбуждение выполняется фирмой как на переменном, так и на постоянном токе.

В первом случае, как это видно из схемы на рис. 227, пуск производится вручную при помощи нажатия кнопки после включения трехфазного трансформатора возбуждения. В цепи анодов имеются анодные реактивные катушки. При желании ток возбуждения может быть полезно использован для нагревания печки сопротивления ртутного насоса, а также для зарядки небольшой аккумуляторной батареи на 24 вольта и емкостью 24 ампер-часа, обслуживающей электромагнитный механизм автоматически действующего вакуумного крана. Этот кран помещен между ртутным насосом и масляным вращающимся и должен быть закрыт во время остановки мотора, так как в противном случае масло и газы проникнут в вакуумную трубу и нарушат правильность работы вакуумной

системы. Закрытие крана производится упомянутым электромеханизмом, как только электродвигатель остановится вследствие прекращения подачи тока. Открывается кран обычно рукой, но у полностью автоматизированных установок открытие совершается автоматически.

В том случае, когда не имеется самостоятельного источника переменного тока низкого напряжения на 110 или 220 вольт, предусматривается питание шин местных нужд от вспомогательного трансформатора, приключенного непосредственно к сети высокого напряжения.

Необходимая мощность трансформатора 5—10 кВт, в зависимости от числа установленных ртутных выпрямителей. Как главный, так и вспомогательный трансформатор защищены со стороны сети высокого напряжения реакторами.

На приведенной схеме помещен регулировочный ступенчатый трансформатор, который будет подробно описан в главе о регулировании напряжения ртутных выпрямителей. Средняя точка трансформатора заземлена через конденсатор на случай возможных возникнуть перенапряжений.

Что касается зажигания и возбуждения на постоянном токе, то ССВ применяет в качестве источника постоянного тока стеклянный ртутный выпрямитель, который при 75 вольтах со стороны выпрямленного тока дает 12—15 ампер. Ток возбуждения поддерживается приблизительно равным 10—12 ампер. Внутри стеклянного выпрямителя падение напряжения около 15 вольт, остальные 60 вольт расходуются на нагревательный элемент насоса. Кроме того 200—250 ватт может быть еще взято на питание реле, зарядку батарей и т. п.

Приводим схему включения вспомогательного стеклянного выпрямителя (рис. 228). Замыкая переключатель *f* налево, мы возбудим трансформатор *b*, произойдет автоматический пуск стеклянной колбы при помощи соленоида *k*, реле *l* и *m*.

Ток стеклянного выпрямителя пройдет последовательно через печь насоса и соленоид *d*, который опустит стержень *e* до соприкосновения со ртутью, вследствие чего соленоид окажется шунтированным. Втягивающее действие его ослабнет, анод *e* поднимется, и в главном выпрямителе зажжется дуга возбуждения.

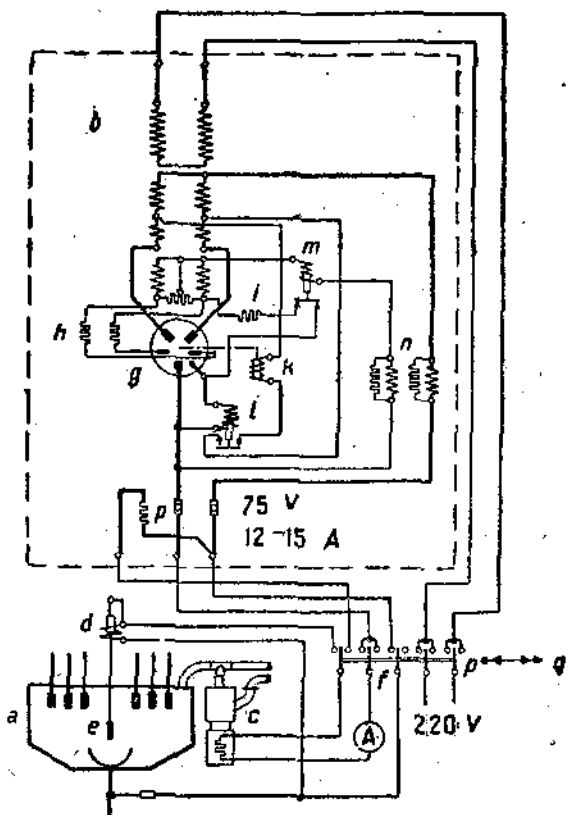


Рис. 228. Схема включения вспомогательного стеклянного ртутного выпрямителя фирмы ССВ при зажигании и возбуждении ртутного металлического выпрямителя на постоянном токе.

Если переключатель переведен в правое положение, то зажигание и возбуждение окажутся выключенными, насос же будет производить откачку выпрямителя, что часто бывает необходимо перед пуском в случае значительного нарушения вакуума. Чтобы скомпенсировать в этом случае падение напряжения в дуге, вводится добавочное сопротивление p . Одна из реактивных катушек l помещена в цепь возбуждения стеклянного выпрямителя, другая — в цепь возбуждения металлического.

Для защиты от могущих возникнуть в цепи возбуждения перенапряжений имеется особое сопротивление.

Габаритные размеры комплекта стеклянного выпрямителя со всеми указанными в схеме элементами сравнительно невелики: занимаемая им площадь: 40×40 см, высота 90 см.

Система зажигания и возбуждения на постоянном токе вносит некоторое упрощение в конструкцию выпрямителя, так как в этом случае требуется один добавочный анод и меньше места на анодной плите, однако само это устройство довольно сложно, как видно на приведенной схеме; вполне возможны неисправности в работе реле и качающего механизма, поэтому такую систему следует считать менее надежной, чем зажигание и возбуждение на переменном токе.

Отметим еще, что у современных конструкций выпрямителей SSW пружина, поднимающая стержень анода зажигания, заменена поплавком, плавающим в ртути, которая налита в небольшой металлический цилиндр.

На рис. 229 легко рассмотреть детали этого устройства. Подобный механизм имеет то преимущество перед обыкновенной пружинной, что он обладает значительным демфирующим действием и исключает возможность возникновения резонансных колебаний стержня.

7. Выпрямители фирмы Bergmann.

В конструктивном отношении выпрямители этой фирмы отличаются сравнительной простотой, но производство их началось не так давно, поэтому не имеется достаточных данных об их эксплуатационных качествах.

Как видно на рис. 230, вакуумный сосуд у этих выпрямителей выполнен в виде цилиндра, как и у фирмы BBC, с легко снимающейся стальной крышкой толщиной 5 см.

Особый интерес представляет устройство катода; оно иное чем у других фирм. В углубление, имеющееся в нижней части рабочего цилиндра, вставляется тонкостенная чашка из фарфора или кварца и закрепляется там при помощи трех скоб. Между стенками чашки и сосуда оставляется небольшой зазор, заполняемый ртутью, с той целью, чтобы чашка при нагревании могла свободно расширяться по всем направлениям.

Ток к катоду подводится не снизу, а сверху, при помощи длинного металлического стержня, изолированного фарфоровой трубкой. Благодаря такой кон-

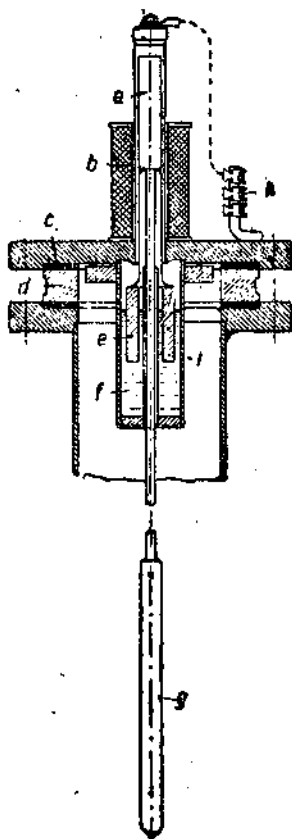


Рис. 229. Устройство зажигающего приспособления ртутьно-металлических выпрямителей фирмы SSW.

струкции катода, оказалось возможным сделать водяной кожух в виде цилиндрического резервуара и опустить в него рабочий цилиндр. Кроме упрощения конструкции достигается более интенсивное охлаждение катода со всех сторон

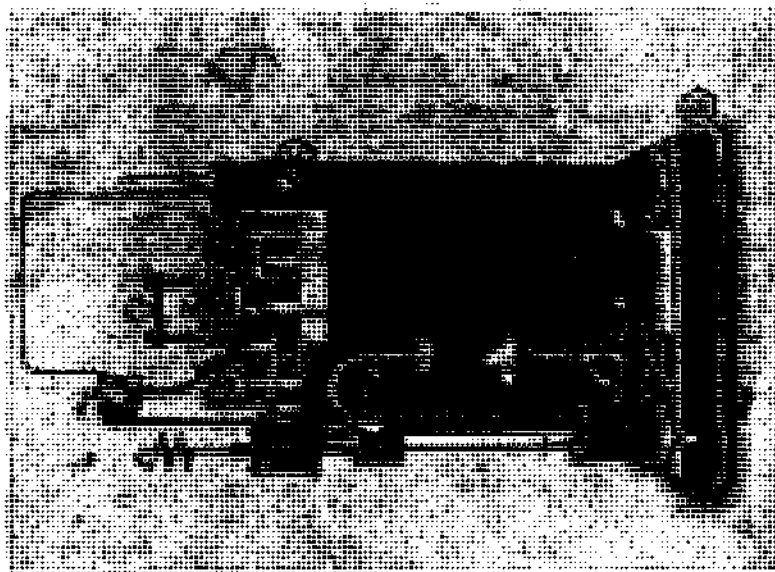


Рис. 231. Внешний вид крупно-металлического выпрямительного аппарата фирмы Bergmann.

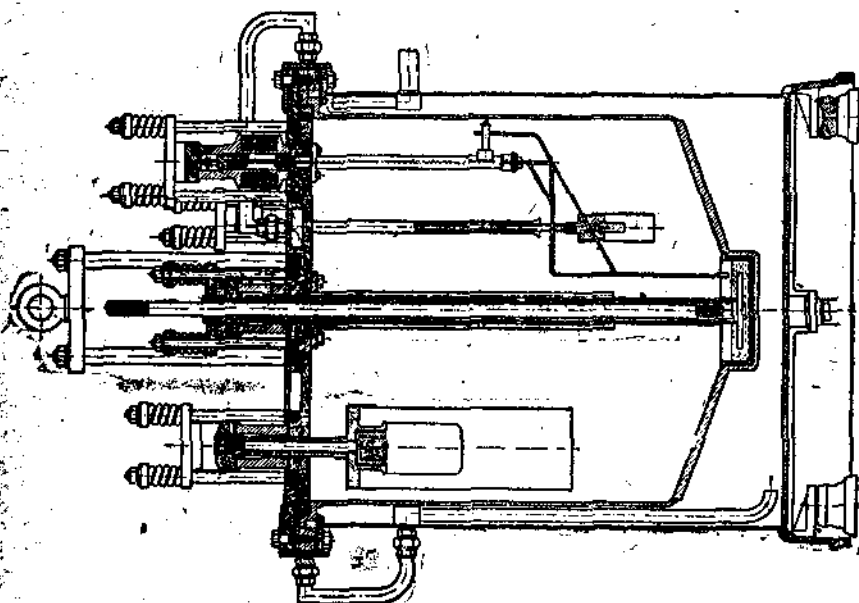


Рис. 230. Разрез металлического крупного выпрямителя фирмы Bergmann.

и затем уничтожается существующее у других систем соединение между фланцами рабочего цилиндра и катода, непроницаемости которого довольно трудно достигнуть в виду большого диаметра шва.

Главные электроды — из графита. Хорошая излучаемость графитовых анодов дала возможность фирме отказаться от анодных радиаторов, при этом анодные стержни делаются возможно тоньше, чтобы меньшее количество тепла проходило от электродов к фарфоровым изоляторам и вводам.

Уплотнения анодных швов и катодного ввода осуществляются при помощи свинцовых шайб, находящихся под давлением сильных пружин и алюминиевых колец, защищающих свинец от воздействия ртутных паров. Непроницаемость шва между крышкой и флянцем сосуда достигается применением асбеста и ртутн.

Путь охлаждающей воды можно проследить на разрезе выпрямителя: вода сначала поступает в рубашку насоса, затем проходит в широкий канал между катодным вводом и анодными флянцами, переходит в канал, сделанный во фланце рабочего цилиндра для охлаждения ртутного уплотнения, после этого течет внутрь водяного кожуха выпрямителя прямо к катоду и выходит наружу в верхней части кожуха.

Выпрямитель помещается на литой железной подставке (рис. 231) которая монтируется на прочных фарфоровых изоляторах.

Габариты выпрямителей фирмы Bergmann очень невелики: так тип G 1000 на 1000 А занимает площадь $95 \times 125 \text{ см}^2$, а выпрямитель на 2000 А требует $125 \times 155 \text{ см}^2$.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

ВАКУУМНАЯ АППАРАТУРА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РТУТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.

1. Насосы предварительного разрежения для ртутных выпрямителей.

В начале первой главы этой части уже было указано, что для получения предварительного вакуума в установках с металлическими ртутными выпрямителями применяется вращающийся масляный насос (капсюльный) типа Гаде (Gaede) (см. вакуумную схему выпрямителя рис. 232). На рис. 233 изображено его устройство.

Внутри цилиндрической коробки А (корпус насоса) помещен сплошной цилиндр В, который может вращаться на валу, эксцентрично расположенном в коробке А. В верхней части оба цилиндра по всей длине плотно соприкасаются. В диаметральной направленности рабочий цилиндр имеет прорез, и в него вставлены две пластинки (капсюли) с пружиной между ними. При вращении в направлении, указанном на рис. 233 стрелкой, пластины все время прижимаются пружиной к стенкам корпуса, и воздух из откачиваемого пространства засасывается в камеру внутри насоса; затем при дальнейшем вращении объем этой камеры уменьшается, и воздух выталкивается через пластинчатый клапан наружу.

Необходимо отметить важную роль масла в работе этих насосов: оно служит здесь не только в качестве смазки, но и воздушным уплотнением.

В новых конструкциях насос погружается в масляную ванну, откуда масло проникает внутрь корпуса и здесь, смазывая трущиеся поверхности, образует между ними тонкий слой, который препятствует проникновению воздуха в область с высоким вакуумом.

Постепенно масло внутри корпуса распыляется, смешивается с воздухом и выбрасывается через выхлопное отверстие в ванну с маслом.

Все ответственные детали насоса сделаны из стали. Погружение в масло вместо устройства кольцевой смазки, упрощает конструкцию насоса и делает

его работу вполне надежной. Кроме того он отличается продолжительностью службы и простотой ухода: время от времени необходимо добавлять масло или даже совершенно сменять его, так как с грязным или сырым маслом насос

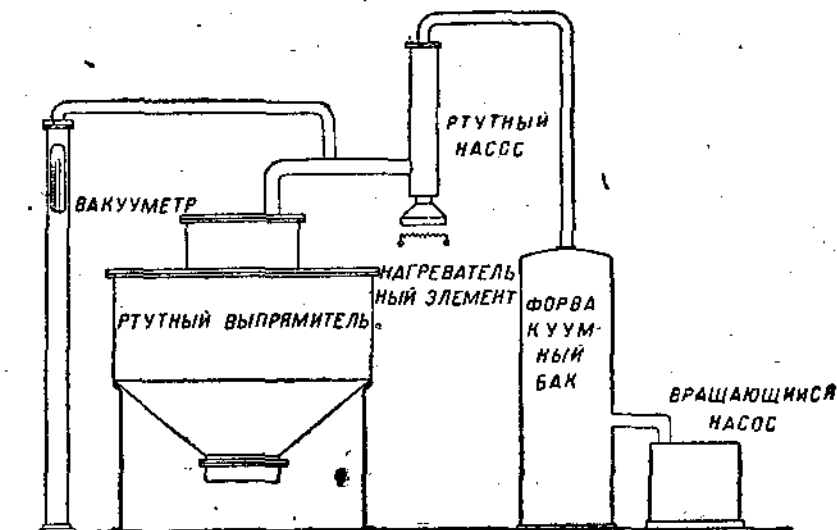


Рис. 232. Вакуумная схема ртутного металлического выпрямителя.

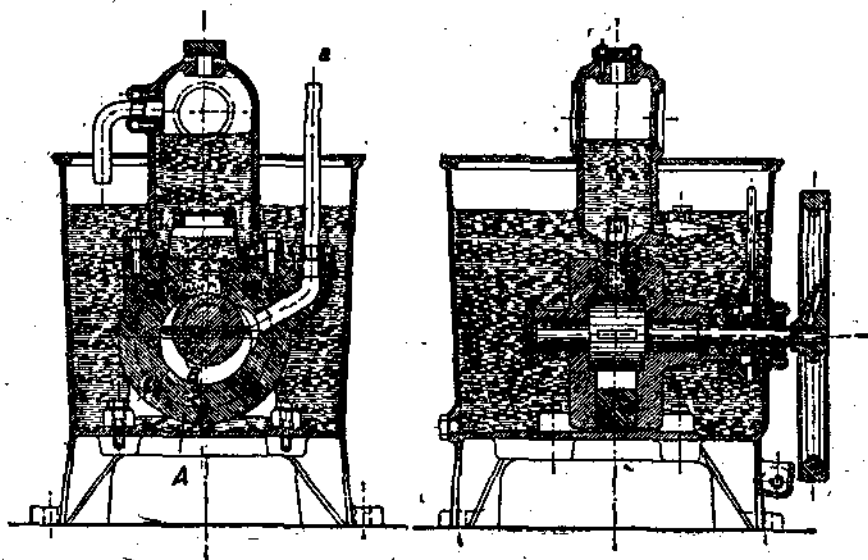


Рис. 233. Вращающийся масляный насос капсульного типа.

работает скверно. Предельное давление, достигаемое вращающимся масляным насосом Гэде, обычно около $10 - 25 \mu$ ($0,010 - 0,025$ мм ртутного столба.); два насоса, соединенных последовательно, дают возможность довести давление до 2μ

(0,002 мм) в сосуде емкостью 10 литров в течение 6—7 минут. Необходимое число оборотов—около 500 в минуту.

В СССР масляные вращающиеся насосы изготавливает завод „Светлана“ в Ленинграде.

Из заграничных фирм, выпускающих эти насосы и вообще занимающихся производством вакуумной аппаратуры, наиболее известны фирмы A. Pfeiffer, Leybold и др.

* Насос приводится в движение электродвигателем, обычно трехфазным с коротко замкнутым ротором.

Большинство заграничных фирм, а также ВЭО, применяют непосредственное соединение насоса с мотором в виду его простоты; однако при 500 оборотах в минуту электродвигатель имеет довольно значительные размеры при сравнительно небольшой его мощности. Поэтому фирма Bergmann предпочитает зубчатую передачу. По данным фирмы SSW и завода „Электросила“ требуемая мощность мотора около 500 ватт при $\cos \varphi = 0,45$.

2. Ртутные конденсационные насосы, применяемые для достижения и поддержания вакуума в металлических сосудах ртутных выпрямителей.

Ртутные конденсационные насосы Лангмуира имеют широкое распространение в вакуумной технике для достижения глубоких разрежений, характеризующихся давлением в 0,001 мм ртутного столба и ниже. Они просты по своей конструкции, надежны в работе и не требуют почти никакого ухода.

Для поддержания вакуума в сосудах ртутных выпрямителей они изготавливаются из металла. По принципу действия ртутный конденсационный насос напоминает собою эжектор.

ОТКАЧИВАЕМОЕ
ПРОСТРАНСТВО

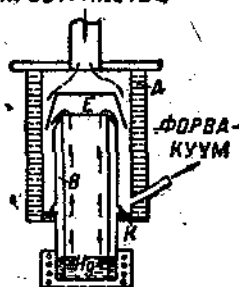


Рис. 234. Схема ртутного конденсационного насоса фирмы SSW.

На рис. 234 изображена схема устройства такого насоса, применяемого для ртутных выпрямителей фирмой SSW. По своей конструкции он очень сходен с первым металлическим насосом, построенным Лангмуиром.

Металлический цилиндр A имеет два отверстия, из них верхнее соединено с откачиваемым пространством, а второе внизу с форвакуумным насосом.

Снаружи этот цилиндр окружен водяной рубашкой, а внутри его помещается второй цилиндр B с расширением внизу, над верхним же его отверстием устроена крышка E.

На дне насоса находится ртуть, которая подогревается при помощи электрической печи. Обыкновенно ртуть кипит во время откачки при температуре 100—110° в вакууме, поддерживаемом форвакуумным насосом.

На схеме сплошными стрелками показано движение паров ртути, которые выходят через цилиндрическую щель с большой скоростью в пространство, охлаждаемое водой, температура которой поддерживается около 30°. Попадая на холодные стенки цилиндра A, ртутные пары быстро конденсируются и стекают сначала в цилиндрический канал K, а затем на дно насоса.

Вследствие энергичной конденсации паров в области выходного отверстия создается высокий вакуум, куда устремляются молекулы газов из откачиваемого сосуда.

В выходящей струе ртутных паров нет посторонних газов, их парциальное давление внутри струи равно нулю. Поэтому молекулы воздуха диффундируют

внутри струи. Здесь они подвергаются ударам быстро движущихся по направлению к стенкам тяжелых молекул и благодаря этому сами направляются к форвакуумному отверстию. Отсюда ясно, что насосы Лангмуира являются насосами молекулярными. Действие их основывается на диффузии газов и на использовании кинетической энергии паров ртути.

В СССР завод „Электросила“ для своих выпрямителей изготавливает также и конденсационные насосы, которые работают вполне удовлетворительно и даже экономичнее зарубежных. Схему устройства насосов этого завода можно видеть на рис. 235.

Ртутные пары с большой скоростью выходят из сопла 3 и, устремляясь через горловину 4 в рабочий цилиндр 5, увлекают вместе с собою откачиваемые из ртутного выпрямителя газы, которые поступают в промежуточный бак. На своем пути в рабочем цилиндре насоса пары ртути встречают так называемый „рассекатель“, препятствующий им проникать в форвакуумный бак.

„Рассекатель“ сделан из металлического стержня с приваренными к нему металлическими полукруглыми пластинками в таком порядке, как показано на эскизе.

Пары, ударяясь о пластинки, задерживаются в своем движении вверх и постепенно конденсируются на стенках цилиндра. Ртутный конденсат скопляется вокруг горловины, откуда по изогнутой трубке 10 направляется в резервуар со ртутью. Частицы же газов, описывая зигзагообразный путь между пластинками, как показано короткими стрелками, уходят в форвакуумный бак.

При непосредственном охлаждении проточной водой насоса вполне возможно разрушение стенок рабочего цилиндра вследствие электролиза. Чтобы избежать этого, применяется косвенное охлаждение проточной водой; кожух насоса заполняется маслом, которое в свою очередь охлаждается водой, протекающей внутри змеевика 7.

Насос монтируется на крышке выпрямителя вместе с короткой широкой отсасывающей трубой.

Выясним теперь влияние различных факторов на работу конденсационных насосов.

Очень важное значение имеет интенсивное охлаждение стенок корпуса насоса вблизи выходного отверстия для паров ртути (сопла).

В случае неполной конденсации ртутных паров, несконденсировавшиеся молекулы ртути будут отражаться от стенок в разных направлениях, и значительная масса ртутного пара может приобрести некоторую скорость по направлению к откачиваемому пространству; вследствие этого создается препятствие проникновению газа в струю пара, выходящего из сопла. Температура вблизи сопла должна быть настолько низка, чтобы не происходило также вновь испарения в большом количестве конденсирующейся ртути.

Теоретически при условии идеальной конденсации и отсутствии выделения газов из стенок сосуда, насосы этого типа не имели бы предела разрежения, а действительности предел существует, но он тем меньше, чем совершеннее охлаждение.

Производительность насоса, т. е. объем газа, откачиваемого при данном давлении в единицу времени, скорость откачки, давление в форвакууме, против

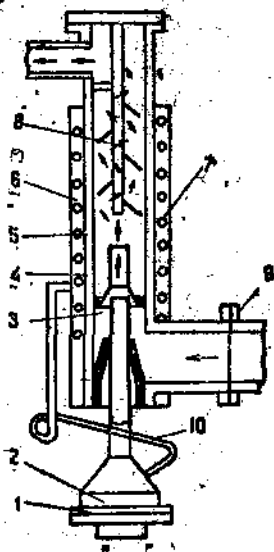


Рис. 235. Схема ртутного конденсационного насоса зав. „Электросила“ ВЭО.

которого насос может работать, зависит от конструктивных особенностей насосного агрегата, числа ступеней, интенсивности подогрева ртути. Все фирмы, изготавливающие вакуумную аппаратуру, опытным путем устанавливают размеры основных элементов насоса.

Чем уже сопло, тем большее форвакуумное давление сможет преодолевать насос. К такому же результату приводит и увеличение числа ступеней.

Так например, трехступенчатые насосы могут откачивать даже при противодавлении порядка 20 мм ртутного столба, для одноступенчатых оно понижается до 8 мм.

Благодаря этому сокращается время откачки, потому что насос может раньше вступить в работу, и кроме того увеличивается предел разрежения.

Трехступенчатый насос, применяемый фирмой Bergmann, может достигнуть разрежения 10^{-5} — 10^{-6} мм ртутного столба в стеклянных колбах и 10^{-4} мм ртутного столба в металлических сосудах.

Однако большинство фирм (BBC, SSW и завод „Электросила“) предпочитают одноступенчатые насосы, как более простые по своей конструкции.

Устройство насоса с 3 ступенями откачки фирмы AEG показано на рис. 236. Из него видно, насколько усложняется его конструкция. Рабочие пары ртути проходят через три сопла, из них верхнее — наиболее широкое, нижнее — самое узкое, так как оно работает против значительного форвакуумного давления. Сконденсировавшаяся ртуть стекает вниз по трубкам, расположенным на рис. 236 слева от центральной трубки, по которой ртутные пары поднимаются вверх.

Мощность, расходуемая на нагревание ртути, мало улучшает производительность насоса, но в значительной степени повышает его способность работать при худшем форвакууме.

Подогревание ртути в конденсационных насосах фирма AEG производит при помощи особого трансформатора, но гораздо проще и

удобнее применять для этой цели электрическую печь сопротивления, что и делается большинством фирм, в том числе и заводом „Электросила“.

Схема устройства нагревательного трансформатора изображена на рис. 236 справа. Ртуть служит короткозамкнутым витком. Преимущество трансформаторного способа в надежности действия, недостаток — большие размеры трансформатора, примерно 15×20 см у фирмы AEG. Не велик также и к. п. д., но это существенного значения не имеет, в виду малого расхода энергии на насос.

У выпрямителей завода „Электросила“ подогревательный элемент состоит из слюдяной круглой пластинки с намотанной на ней нихромовой проволокой.

Такой элемент должен быть очень тщательно изготовлен, плотность тока в проволоке не должна быть слишком велика, так как при несоблюдении этих условий происходит перегорание элементов.

Электрический ток подводится к печи от отдельного трансформатора с изоляцией вторичной обмотки от первичной и от земли на анодное напряжение, чтобы предохранить сеть местных нужд низкого напряжения от воздействия высокого анодного потенциала, могущего проникнуть во вторичную обмотку вследствие несовершенства изоляторов. Такой трансформатор называют поэтому



Рис. 236. Трехступенчатый ртутный конденсационный насос фирмы AEG (схема устройства).

изолирующим, и его ставят даже с коэффициентом трансформации 1:1, т. е. когда напряжение, подводимое к печи, одинаково с напряжением питающей сети.

Мощность, требуемая на нагревание ртути в насосах у выпрямителей ВЭО, от 300 до 1000 ватт. У зарубежных фирм она выше, а именно около 1200 ватт.

Конденсационный насос должен работать непрерывно во время нагрузки; что же касается масляного, то при наличии форвакуумного бака (см. схему рис. 232) он приводится в действие периодически через довольно продолжительные промежутки времени, которые не трудно определить из простого подсчета.

Пусть например форвакуумный бак в 90 литров установлен для ртутного выпрямителя ВЭО РВ5 на 500 ампер 600 вольт, вакуумный сосуд которого имеет объем 250 литров.

Предположим даже, что натекание воздуха и выделение газов таковы, что давление в вакуумном сосуде могло бы повыситься на 2×10^{-3} мм ртутного столба в час, — это допустимая величина натекания для нормально работающих агрегатов. Эти газы откачиваются конденсационным насосом в бак, и так как его объем в 5 раз меньше, то в баке давление в час будет повышаться на 10×10^{-3} мм. Течь в самом баке сравнительно невелика, ею можно пренебречь. Если имеющийся паро-ртутный насос может преодолевать давление не более 2 мм ртутного столба, то в таком случае без помощи вращающегося насоса можно будет производить откачку в течение времени $\frac{2000}{10} = 200$ часов, или почти 8 дней.

В корпусе новых выпрямителей выделение окклюдированных газов довольно значительно, и поэтому понадобится более частый пуск масляного насоса.

Вообще же на практике вращающийся насос пускают ежедневно примерно на полчаса. У автоматизированных установок он приводится в действие автоматически при определенном давлении газов в форвакуумном баке.

3. Вакуумные краны.

Во время ремонта элементов вакуумной схемы, например одного из насосов или уплотнений соединений вакуумных труб, сосуд выпрямителя должен быть герметически закрыт, так как пребывание рабочего цилиндра даже в течение непродолжительного времени под атмосферным давлением приводит к необходимости формования выпрямителя перед пуском. Такое же закрытие цилиндра целесообразно и в периоды полного бездействия выпрямительной установки, когда выключен даже конденсационный насос, так как уменьшается натекание воздуха в сосуд выпрямителя.

Для этой цели все фирмы устраивают вакуумные краны разных типов, помещаемые в отсасывающей трубе, между корпусом и конденсационным насосом или между конденсационным насосом и форвакуумным (АЕГ).

Наиболее простая конструкция такого крана у фирмы SSW. Это обычный конусообразный, с тщательно шлифованными поверхностями, кран такого же типа, как и применяемые в стеклянной вакуумной аппаратуре.

Для лучшей герметичности шов крана сверху заливается ртутью. Такие краны обладают тем же недостатком, как и подобные им стеклянные: часто они настолько плотно пристают к поверхности отверстия, что бывает очень трудно их повернуть.

Другого типа кран у фирмы АЕГ. Он изображен на рис. 237 в положении открытия. Путь откачиваемых газов показан стрелками. Поворот болтов с двух

сторон крана вызывает изгиб никелевой мембраны по направлению к отверстию проходной трубки и закрытие этого отверстия. Таким образом этот кран двухступенчатый.

Довольно проста конструкция крана завода „Электросила“, ее можно рассмотреть на разрезе выпрямителя на рис. 206. Вращая головку поворотного болта, мы можем очень плотно прижать подвижную часть с резиновой шайбой к шлифной поверхности фланца выходной трубы и этим герметически закрыть щель.

В случае неожиданной остановки мотора, что может быть при прекращении подачи тока в сеть местного питания, отсасывающее действие вращающегося насоса прекратится, и в бак предварительного разрежения проникнет атмосферный воздух.

Предупреждается это нежелательное явление устройством автоматического закрытия крана насоса.

Рис. 237. Вакуумный кран фирмы AEG.

У первых выпущенных ВЭО выпрямителей автоматизация крана достигалась электромагнитным способом, который действовал недостаточно удовлетворительно. Поэтому завод „Электросила“ переконструировал механизм автомата, применив принцип жидкостного зацепления, как это сделано и у форвакуумных насосов фирмы BBC.

Устройство его состоит в следующем (рис. 238). На оси насоса помещено три металлических диска: средний из них 3 закреплен на оси и вращается вместе с ней, два других свободно сидят на ней. Диски 1 и 2 жестко соединены между собой, при этом между ними

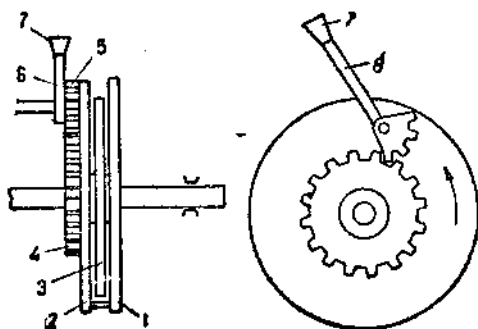


Рис. 238. Автоматически закрывающее приспособление вакуумного крана вращающегося насоса завода „Электросила“ ВЭО.

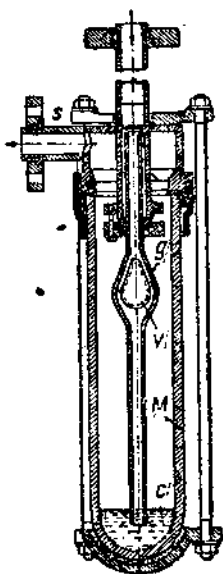


Рис. 239. Автоматический вакуумный затвор фирмы AEG.

и средним диском оставляется небольшой зазор. На диске 2 закреплен зубчатый диск 4, сцепляющийся с зубчатым сектором 5, ось которого в свою очередь соединена с краном насоса и с рукояткой 6. Механизм погружен в масло, заполняющее кожух насоса и пространство между дисками.

После пуска в ход насоса, когда число оборотов ротора достигнет определенной величины, между дисками и маслом развиваются силы взаимного сцепления, достаточные для того, чтобы повернуть крайние диски на некоторый угол, что вызовет поворот зубчатого сектора и открытие крана насоса. В случае остановки насоса, кран возвращается в закрытое состояние противовесом 7, посаженным на конец рукоятки, выходящей наружу кожуха.

Если электродвигатель начнет останавливаться, то сцепляющее действие масла настолько ослабевает, что пружина повернет зубчатый сектор в исходное положение, при котором кран закроет внутреннюю камеру насоса.

Фирма AEG устраивает автоматический затвор по пути из ртутного насоса в форвакуумный бак. Устройство его показано на рис. 239. Затвор состоит из стеклянной колбы M , на дне которой налито немного масла. Кроме того внутри этой колбы проведена стеклянная трубка, соединенная с конденсационным насосом. В средней ее части имеется расширение с поплавком. Когда разность между давлением в штуцере, ведущем к форвакууму, и в вакуумном пространстве превзойдет определенную величину, нормально 10 мм ртутного столба масло под давлением поднимается по внутренней стеклянной трубке до поплавка и заставит его закрыть вакуумное отверстие.

4. Измерение вакуума.

В ртутно-выпрямительных установках встречается надобность в измерении давления от тысячных долей мм ртутного столба в сосуде выпрямителя до нескольких миллиметров в форвакуумном резервуаре.

Форвакуумные давления обыкновенно контролируют при помощи U-образного ртутного манометра, дающего возможность делать отсчеты до $\frac{1}{10}$ мм ртутного столба.

Для измерения же давления в вакуумном сосуде применяется манометр Мас-Leod'a и электрический вакуумметр.

Манометр Мас-Leod'a схематически изображен на рис. 240а. Принцип его действия и обращение с ним общеизвестны.

Желая измерить вакуум, медленно поднимают резервуар Q , наполненный ртутью, до тех пор, пока ртуть не заполнит разветвленную трубку K_2 до черты, находящейся на одной высоте с концом капиллярной трубки K_1 . При этом газ, находящийся в шарообразном объеме V , отделяется от вакуумного пространства и затем сжимается в капилляре K_1 до очень малого объема v (см. также рис. 240б). На основании закона Бойля - Мариотта давление в вакууме определяется из выражения:

$$x = h \frac{v}{V},$$

где h — разность в мм между высотами уровней ртути в капиллярах K_1 и K_2 .

Если сечение трубки $K_1 = q$ мм², то сжатый объем газа $v = qh$ и потому:

$$x = h^2 \frac{q}{V}.$$

Величина $\frac{q}{V}$ постоянна для каждого прибора, следовательно измеряемое давление будет пропорционально квадрату разности высот уровней ртути в обоих капиллярах.

Обыкновенно шкала градируется в тысячных долях мм ртутного столба, и по ней непосредственно отсчитывается величина измеряемого давления x .

При таком способе измерения шкала отсчетов получается квадратичная. Возможно производить еще измерения другим путем, поднимая ртуть до того момента, когда уровень ее достигнет основания капилляра K_1 . В таком случае v будет величиной постоянной, и наблюдаемое давление x оказывается в линейной зависимости от h . Шкала получится равномерной, но диапазон возможных измерений при этом меньше, чем при квадратичной шкале. Если подобрать $\frac{v}{V} = \frac{1}{1000}$, то давления в вакуумном сосуде будут соответственно в 1000 раз меньше чем h .

Дополнительный капилляр K_2 приделывают для избежания ошибок наблюдений, вследствие неодинаковых

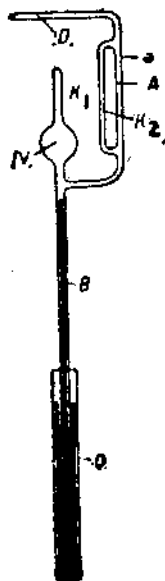


Рис. 240а. Схема устройства манометра Mac-Leod'a.

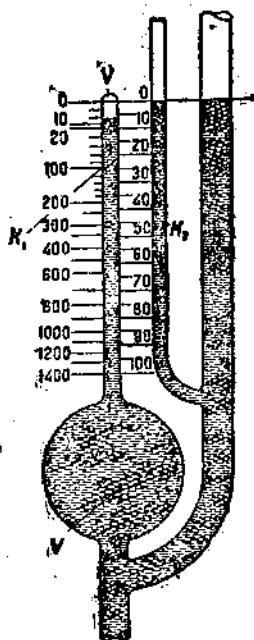


Рис. 240б. Деталь устройства манометра Mac-Leod'a.

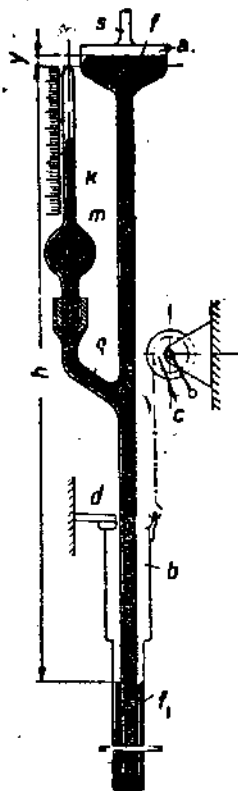


Рис. 241. Вакуумметр фирмы ВВС.

высот менисков ртути в трубках K_1 и A , имеющих разные диаметры. Прибор делается из стекла и помещается в металлический цилиндрический кожух с вырезами для наблюдений за делениями шкалы. Отсчеты производятся тогда, когда колебания ртути успокоятся и вершина мениска в капилляре K_2 установится против вершины капилляра K_1 . Такой метод довольно неудобен, так как требует большой внимательности со стороны наблюдателя и кроме того стекло покрывается с течением времени окислами ртути, и вершина мениска становится плохо видимой.

Фирма ВВС избегает этих недостатков, выполняя прибор по схеме, изображенной на рис. 241.

Из стекла делается только капилляр *K* с шаром, и он вставляется в металлическую барометрическую трубку с большим расширением сверху.

Для измерения давления осторожно поднимают (вращая рукоятку) открытый резервуар до упора и производят отсчет.

Обычная точность измерений по Mac-Leod'у около 1%, но она зависит в сильной степени от природы газов, находящихся в разреженном пространстве.

По данным Гэде приборы Mac-Leod'a могут давать достаточно точные показания для водорода и азота до давлений 10^{-4} мм ртутного столба (0,1 μ).

При наличии кислорода и углекислоты получаются значительные ошибки в виду того, что кислород образует с ртутью вязкое вещество, которое прилипает к стенкам трубок.

Измерения не могут быть точными, если в вакууме находятся пары жидкостей, как например водяные пары, легко конденсирующиеся при комнатной температуре при давлениях, достигаемых в капилляре сжатия, так как манометр Mac-Leod'a вообще применим только к газам, подчиняющимся закону Бойля-Мариотта при измеряемых давлениях.

Наконец вредное влияние влажности газа на результаты наблюдений скывается и в том, что пары воды сильно изменяют высоту мениска ртути в капилляре сжатия по сравнению с добавочным капилляром.

Тщательное прогревание трубок манометра может значительно улучшить его показания.

5. Электрический вакуумметр.

Большое преимущество электрического манометра перед манометром Mac-Leod'a в том, что он указывает давление непосредственно. Кроме того им учитывается также и парциальное давление паров воды, которые конденсируются в манометре Mac-Leod'a.

Действие его основано на свойстве разреженных газов изменять свою теплопроводность почти прямо пропорционально давлению. Это однако справедливо только до известного предела, с увеличением которого теплопроводность становится независимой от давления.

Это критическое давление зависит от среднего свободного пути молекулы и от размеров сосуда.

Пока длина свободного пути меньше расстояния между стенками, до тех пор теплопроводность постоянна. Если свободный пробег больше расстояния от нагретого тела до стенки, теплопроводность будет зависеть от числа молекул в единице объема.

На этом принципе разными исследователями были предложены приборы для измерения малых давлений.

Опишем устройство вакуумметра фирмы BBC. На рис. 242 изображена принципиальная схема вакуумметра этой фирмы, имеющая вид моста Уитстона. Измерения вакуума производятся по наблюдениям над милливольтометром, приключенным к зажимам *A* и *D*.

Четыре ветви мостика делаются из одного и того же материала, с возможно большим термическим коэффициентом электросопротивления (например платины). Две из них помещаются в стеклянный баллон Н-образной формы, две другие находятся между трубками вне вакуума. К точкам *B* и *C* присоединяется источник тока (аккумуляторная батарея или трансформатор).

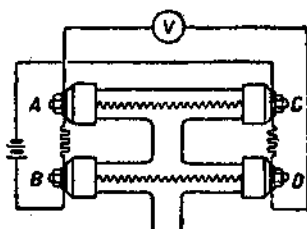


Рис. 242. Принципиальная схема электрического вакуумметра фирмы BBC.

При атмосферном давлении все четыре ветви имеют одинаковое сопротивление, и разность потенциалов в точках *A* и *D* равна нулю.

Стрелка измерительного прибора будет отклоняться только при изменении давления газов в стеклянных трубках. С уменьшением давления уменьшается теплопроводность газа, и вместе с этим повышается сопротивление ветвей в трубках при неизменной величине энергии, подводимой для нагревания проволок.

Мостик помещают в небольшую коробку для избежания влияния температуры окружающей среды.

Вакуумметр можно приключать к источнику постоянного или переменного тока. В первом случае необходима аккумуляторная батарея, и от времени до времени требуется регулировка тока нагревания. При переменном токе эта надобность отпадает, так как в цепь милливольтметра можно включить железное сопротивление, которое будет принимать на себя колебания напряжения и поддерживать ток постоянной силы в приборе. (См. схему включения рис. 243.)

Это сопротивление, называемое баретером, состоит из тонкой железной проволоки, помещенной в стеклянную колбу, похожую на лампы

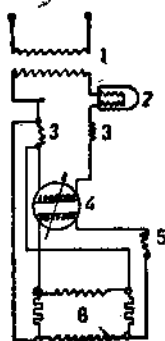


Рис. 243. Схема включения электрического вакуумметра фирмы ВВС.

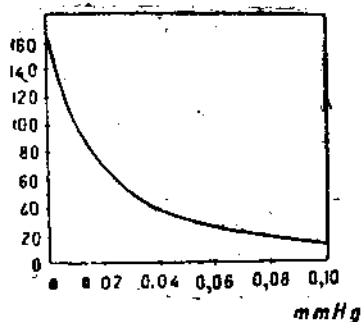


Рис. 244. Образец градуировочной кривой электрического вакуумметра фирмы ВВС.

накаливания. Принцип действия такого сопротивления основан на зависимости сопротивления от температуры проволоки, и работает оно обычно при темнокрасном калении. Чтобы защитить проволоку от окисления кислородом воздуха и вместе с тем сохранить достаточную теплоотдачу в окружающую среду, лампы откачиваются и наполняются водородом.

Кроме этого сопротивления во вторичную цепь трансформатора, питающего измерительный прибор, включаются

дополнительные сопротивления β , к зажимам одного из них присоединяются два узла мостика.

Недостаток электрических измерителей вакуума заключается в том, что их периодически приходится сверять с вакуумметрами Mac-Leod'a, так как они часто начинают давать неверные показания. Примерная кривая градуировки прибора показана на рис. 244

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ.

1. Производительность вакуумных насосов. Построение их характеристик.

Предположим, что вакуумный насос производит откачку из резервуара вместимостью V см³. За бесконечно малый промежуток времени dt насос откачивает элементарно малый объем газа dV и давление в сосуде изменяется на dp . На основании закона Бойля-Марнотта напишем:

$$(V + dV)(p + dp) = pV.$$

Отсюда получаем дифференциальное уравнение:

$$V dp + p dV = 0. \quad (221)$$

Пусть за промежуток времени от t_1 до t_2 давление в сосуде изменилось от p_1 до p_2 . В таком случае по предыдущему уравнению мы сможем найти объем газа, откачанный за интервал времени $\Delta t = t_1 - t_2$:

$$\Delta V = V \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Средний же объем газа, откачиваемый в единицу времени, например 1 сек, будет:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V}{\Delta t} \ln \frac{p_1}{p_2}; \quad (222)$$

при этом объем этот измеряется при некотором среднем давлении между p_1 и p_2 .

Величину $\frac{\Delta V}{\Delta t}$, характеризующую быстроту откачки по объему выбрасываемого газа, назовем производительностью насоса и обозначим ее через S . Это будет следовательно объем газа, откачиваемый при рассматриваемом давлении в единицу времени.

Вообще говоря, это — величина переменная, зависящая от механических свойств всей вакуумной системы, т. е. насоса, соединительных труб, кранов, а также и от давления в сосуде. Однако в известных пределах, при небольших давлениях мы можем практически считать производительность откачки величиной постоянной.

Уравнение (221) можно написать в таком виде:

$$\frac{dV}{dt} = - \frac{V}{p} \frac{dp}{dt}.$$

Здесь $\frac{dV}{dt}$ есть не что иное, как производительность насоса S в данный момент времени t .

Производная же $\frac{dp}{dt}$ определяет собою быстроту изменения давления в сосуде по мере откачки. Ее иногда называют скоростью откачки.

Если принять, что $S = \text{const}$, то из предыдущего уравнения легко найти кривую изменения давления p в функции времени или кривую давлений:

$$p = p_0 e^{-\frac{S}{V} t}, \quad (223)$$

где p_0 есть некоторое начальное давление в сосуде, при котором начинается откачка. Эту характеристику легко получить из опыта, отмечая давления в сосуде при откачке. По снятой же кривой давлений строят кривую производительности, пользуясь соотношением (222):

$$S = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{V}{t_2 - t_1} 2,3 \log \frac{p_1}{p_2}, \quad (224)$$

где p_1 и p_2 — давления, соответствующие моментам времени t_1 и t_2 . Следует обратить внимание на то обстоятельство, что уравнение (224) так же, как и

предыдущие соотношения, справедливо при условии, что рассматриваемые давления далеки от предельного разрежения, достигаемого насосом.

Вблизи этого предела выражение (224) необходимо применять в таком виде:

$$S = \frac{V}{p_a - p_1} \ln \frac{p_1 - p_0}{p_2 - p_0}. \quad (225)$$

Производительности насоса S можно приписать еще иной физический смысл. Допустим, что объем сосуда V равен S см³, тогда из уравнения (223) найдем, что по прошествии одной секунды давление в сосуде будет:

$$p = \frac{p_a}{e} = 0,37 p_a,$$

т. е. насос с производительностью S см³/сек в состоянии в закрытом сосуде емкости S см³ в 1 секунду понизит давление на 63% от первоначального, т. е. бывшего в сосуде в начале рассматриваемой секунды.

На рис. 245 приведены кривая производительности и кривая откачки одного из ртутных насосов завода „Электросила“. Производительность насоса устанавливается по максимальному значению величины S . Следовательно, относительно данного типа насоса можно сказать, что он обладает производительностью в 4200 см³/сек.

2. Влияние вакуумных труб на производительность разрежающих насосов.

Сопротивление прохождению газов в вакуумных трубах, соединяющих отка-

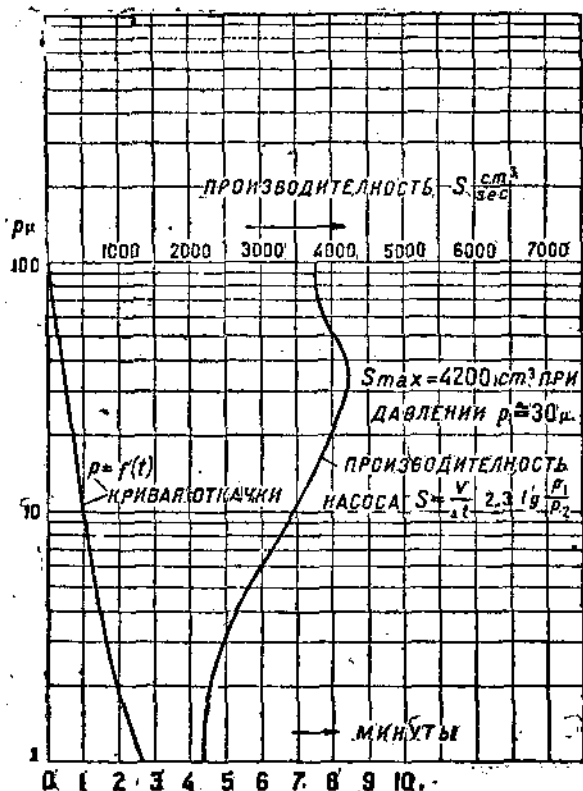


Рис. 245. Вакуумные характеристики одного из ртутных конденсационных насосов завода „Электросила“ ВЭО.

чиваемый сосуд с насосом, возрастает с увеличением их длины и уменьшением диаметра, поэтому производительность насосного агрегата находится в тесной зависимости от размеров этих труб.

Количественные соотношения, дающие возможность производить нужные расчеты, установлены в работах Пуазейля (Poiseuille), Кнудсена (Knudsen), Гэде и др., которые занимались подробным изучением вопроса о прохождении газов через трубы и узкие отверстия.

Представим себе, что два сосуда с давлением p_a и p_b соединены цилиндрической трубкой, при этом $p_b > p_a$ (рис. 246).

Пусть кроме того: D — Φ газопроводящей трубы, l — длина ее в см, ρ — плотность газа (относительно воды) при давлении 1 дин/см².

Как известно

$$p = \frac{M}{29,15 \times 10^3 T},$$

где M — молекулярный вес, а T — абсолютная температура газа.

Тогда для газового потока, движущегося по трубе, справедливо уравнение Кнудсена:

$$Q = pV = \frac{p_b - p_a}{W \sqrt{\rho}}, \quad (226)$$

если рассматриваемые давления значительно ниже атмосферного.

Величина $Q = pV$ представляет собою произведение объема газа, проходящего через трубу в 1 сек на давление, при котором этот объем измерен; W — некоторый постоянный коэффициент, зависящий от размеров трубы.

По аналогии с законом Ома величину $W \sqrt{\rho}$ можно условно рассматривать, как сопротивление трубы движению газового потока, обратную же вели-

чину, т. е. $\frac{1}{W \sqrt{\rho}}$, мы назовем пропускной способностью труб.

Для цилиндрической трубы:

$$W_a = \frac{6l}{\sqrt{2\pi} D^3} = 2,39 \frac{l}{D^3}. \quad (227)$$

Для круглого отверстия:

$$W_o = \frac{3,184}{D^2} \quad (228)$$

При очень длинных тонких трубках сопротивлением выходного отверстия можно пренебречь.

В уравнение Кнудсена, применяемое только для низких давлений, не входит коэффициент трения в газах; объясняется это тем обстоятельством, что в сильно разреженных газах длина свободного пробега частиц значительно больше внутреннего диаметра трубы и поэтому не может быть и речи о внутреннем трении. По данным Кнудсена ошибка при вычислениях по приведенному уравнению не превышает 5%, если

$$\frac{D}{l} = \frac{\text{внутренний диаметр трубы}}{\text{длина свободного пробега}} \leq 0,4.$$

При среднем давлении в 1 бар (дин/см²) упомянутый закон молекулярного истечения газового потока приложим, пока диаметр труб не будет превышать следующих величин в см:

Газ	→ Воздух	H ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	CO
D <	97,5	69	37,2	39,7	24,8	36,9

Обозначим пропускную способность газовой трубы через

$$F = \frac{1}{W \sqrt{\rho}} = \frac{Q}{p_b - p_a} \quad (\text{см. уравнение 226}).$$

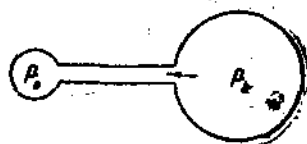


Рис. 246.

Если производительность самого насоса S_a , то общая производительность насоса и соединительной трубы S_b будет уже меньше.

Во время установившегося режима откачки одно и то же количество газа проходит в 1 сек через все элементы вакуумной установки (сосуд, трубу, насос), поэтому справедливо соотношение:

$$Q = F(p_b - p_a) = S_a p_a = S_b p_b.$$

Исключая из этого уравнения p_a и p_b , найдем:

$$\frac{1}{S_b} = \frac{1}{S_a} + \frac{1}{F} = \frac{1}{S_a} + W \sqrt{p}. \quad (229)$$

Рассматривая $\frac{1}{S_a}$ и $\frac{1}{S_b}$ как сопротивления, можно сказать, что общее сопротивление всей системы равно сумме сопротивлений насоса и соединительных труб, что и следовало ожидать.

Отсюда практический вывод: для лучшего использования насоса необходимо по возможности уменьшать сопротивления соединительных труб, делая их короче и увеличивая главным образом их диаметр, так как пропускная способность труб пропорциональна кубу их диаметра.

Назовем коэффициентом использования вакуумного насоса отношение:

$$\sigma = \frac{S_b}{S_a} = \frac{\text{производительность всей системы}}{\text{производительность самого насоса}}.$$

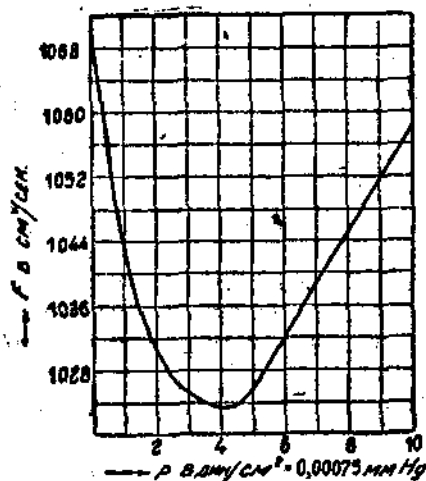


Рис. 247. Зависимость пропускной способности газовой трубы от давления.

Из ур-ния (229) следует:

$$S_b = \frac{F S_a}{F + S_a}$$

и

$$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{S_a}{F}}.$$

Выясним на примере влияние труб на работу насоса.

Возьмем трубку в 10 см длины и в 1 см диаметром. Пропускная способность такой трубки $F = \frac{1}{W \cdot \sqrt{p}}$ для воздуха при комнатной температуре $1000 \text{ см}^3/\text{сек}$. Пусть производительность насоса $S_a = 2000 \text{ см}^3/\text{сек}$. Тогда коэффициент использования его будет:

$$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{2000}{1000}} = 0,33,$$

т. е. насос с такой вакуумной трубой окажется использованным только на 33%, и производительность всей вакуумной системы будет $660 \text{ см}^3/\text{сек}$.

Не трудно подсчитать, что, поставив соединительную трубу диаметром 5 см и той же длины, мы сможем повысить коэффициент использования вакуумного агрегата до:

$$\frac{1}{1 + \frac{2000}{12700}} = 0,86.$$

Ниже приведены несколько значений пропускной способности вакуумных труб длиной в 100 см в зависимости от диаметра:

$D =$	1	2	3	4	5	см
$F =$	400	800	2700	6500	12700,	

Очень интересная кривая, представляющая зависимость пропускной способности F трубки, диаметром в 1 см (в свету) и длиной 10 см, от давления в барах [$1 \text{ бар} = 0,75 \times 10^{-3} \text{ мм ртутного стояба}$], приведена на рис. 247. По этой кривой соответствующим пересчетом по приведенным выше формулам легко найти F для вакуумных труб других размеров. Кривая дана для температуры 20° .

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ РТУТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.

Выделяемое внутри металлического ртутного выпрямителя тепло почти полностью отводится наружу путем водяного охлаждения, так как через конвекцию и излучение выделяется с поверхности выпрямителя небольшая часть этого тепла.

Во избежание обратного зажигания, как уже было выяснено, температура ртутных паров, а следовательно, и отдельных элементов выпрямителя, не должна превышать определенных величин.

Фирма ВВС не допускает длительного превышения температуры корпуса выпрямителя выше 50° и насоса выше 40° .

ВЭО для своих выпрямителей устанавливает наиболее благоприятную температуру вакуумного сосуда в пределах от 25 до 35° .

Средний часовой расход воды, при ее начальной температуре 15° , составляет примерно 1 литр на 100 ампер выпрямленного тока в 1 мин. Насос фирмы ВВС требует 0,74 литра/мин.

Выпрямители ВЭО расходуют 0,8 литра в час на 1 ампер.

Для охлаждения в зависимости от местных условий, силы тока, напряжения и качества воды применяются две системы: непосредственное охлаждение проточной водой и циркуляционное охлаждение.

Первый способ самый простой — свежая вода непосредственно из водопровода поступает в водонапорный бак и из него течет к выпрямителю и насосу. Схема подобного охлаждения была приведена в главе III при описании выпрямителей ВЭО. В более общем виде она представлена на рис. 248.

Вода для охлаждения насоса у некоторых фирм подается непосредственно из водопровода, у других в насос поступает часть воды, прошедшей через кожух катода или выпрямителя. Присутствие водонапорного бака не обязательно. Вместимость его рассчитывается на одно- или двухчасовой запас воды; высота бака над выпрямителем должна быть около 3 м.

Регулирование количества воды, поступающей в бак, выпрямитель и насос, производится вручную при помощи вентиля a . Однако для регулировки по-

дачу воды в кожух выпрямителя желательнее иметь автоматически действующий регулятор охлаждения *d*.

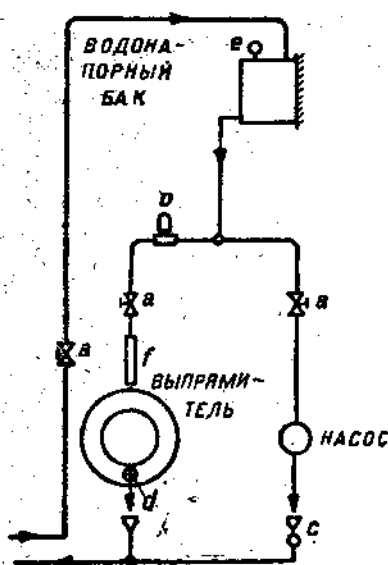


Рис. 248. Схема непосредственного охлаждения металлического ртутного выпрямителя.

С целью изоляции элементов выпрямителя от земли, подводящие и отводящие водопроводные трубки присоединяют к выпрямителю при помощи резиновых шлангов. У выпрямителей фирмы ВВС отходящая вода сливается в особые воронки, и таким путем достигается необходимая изоляция.

Рассмотренная система охлаждения применима только в том случае, если рабочее напряжение ртутного выпрямителя не выше 2000 вольт (ВВС) и если вода местного источника водоснабжения удовлетворяет определенным требованиям, а именно — она должна быть чистой, без посторонних примесей и кислот, жесткостью не должна превышать 14° по немецкой шкале жесткости. Наличие кислот или значительного количества щелочей создает благоприятные условия для

В полуавтоматических и автоматических установках при выключении выпрямителя применяются автоматические вентили *o*, открываемые и закрываемые при помощи электромагнита; по желанию они могут быть помещены в различных местах водопроводной цепи. Наконец на случай прекращения воды часто предусматриваются соответствующие сигнальные приспособления на промежуточном баке и у водоспускной воронки конденсационного насоса (ВВС, ВЭО).

В случае отсутствия в месте установки водопровода в качестве источника свежей воды может быть использован какой-либо ближайший источник, напр. колодец, река; при этом потребуются еще небольшая насосная установка для нагнетания воды в промежуточный бак.

В обоих рассмотренных случаях водоснабжения, от водопровода или местного источника, рекомендуется иметь резервное водоснабжение; в качестве такового может быть использована вторая водопроводная магистраль, или при отсутствии ее резервом может послужить местный колодец.

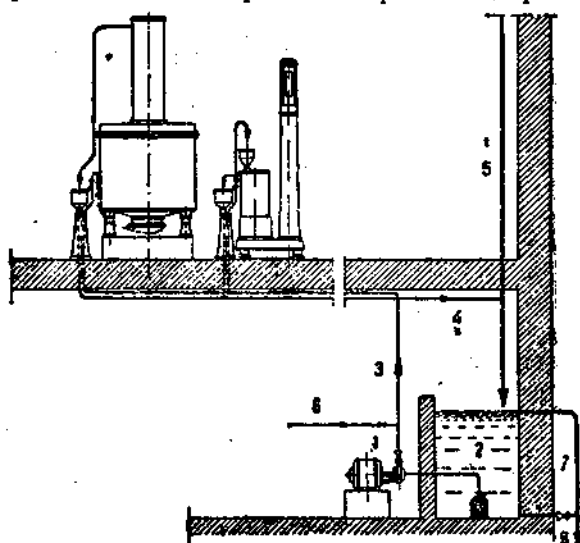


Рис. 249. Схема циркуляционного охлаждения металлического ртутного выпрямителя с естественным охлаждением воды.

электролиза и приводит к быстрому разрушению металлических стенок сосуда.

Если вода не удовлетворяет указанным требованиям или рабочее напряжение выпрямителя превышает 2000 вольт, необходимо прибегнуть к циркуляционному охлаждению. При такой системе насос заставляет воду, предварительно очищенную, совершать замкнутый цикл в цепи с выпрямителем и охладителем. От последнего тепло в свою очередь может быть отнято путем естественного воздушного охлаждения или же посредством искусственного охлаждения с использованием для этой цели проточной воды или вентиляторного дутья.

Первый из указанных способов очень прост. Его схема представлена на рис. 249.

Вращающийся насос 1 из бака 2, вместимостью от 2 до 4 м³ и расположенного в подвальном помещении, подает воду в выпрямитель и вакуумный насос по трубе 3.

Труба 6 служит для подвода свежей проточной воды, а труба 5 для подвода в бак дождевой воды. Чтобы не допускать перелива воды через стенки бака, устроена труба 7, с ней же соединена сливная труба 8. На дне бака расположен фильтр, через



Рис. 250. Радиаторный охладитель фирмы ВВС для выпрямительного ртутно-металлического устройства высокого напряжения.

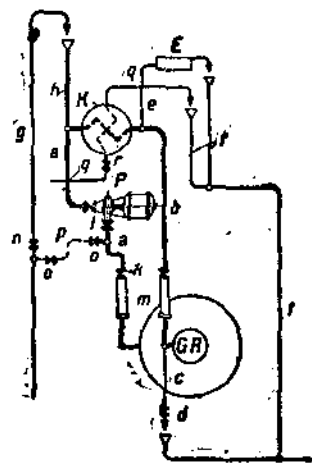


Рис. 251. Схема косвенного циркуляционного охлаждения ртутно-металлического выпрямителя фирмы ВВС.

который вода засасывается в насос. Подобное охлаждающее устройство удобно только для сравнительно небольших установок с низким напряжением, так как оно требует помещения для бака, размеры которого должны быть по возможности больше.

В установках с высоким напряжением охлаждающий бак заменяется металлическим радиатором, установленным на изоляторах, соответствующих данному напряжению.

Такой радиаторный охладитель фирмы ВВС показан на рис. 250.

С целью повышения интенсивности охлаждения и уменьшения размеров охладителя возможно поставить воздушный вентилятор с электродвигателем, как это делается в установках с стеклянными выпрямителями.

Разумеется при выборе той или другой системы охлаждения необходимо иметь в виду и экономические соображения. Если проточная вода очень дорога, то даже при хороших ее качествах может оказаться более выгодным циркуляционное охлаждение рас-

смотренных типов с естественным или искусственным воздушным охлаждением. К таким же устройствам придется прибегнуть в местностях с недостатком воды.

Если холодной воды имеется достаточное количество и она дешева, но очень загрязнена или жестка, то тогда циркуляционную воду заставляют протекать через эжевик или систему труб, охлаждаемых снаружи холодной водой.

Фактически в данном случае охлаждение производится тоже проточной водой, но только не непосредственно, а косвенным путем.

Схему такой системы косвенного охлаждения можно видеть на рис. 251. На ней через *K* обозначен охлаждающий аппарат, в который свежая вода поступает через трубку *d* и сливается в отводящую трубу *f*.

При повышенной температуре окружающего воздуха или при продолжительной перегрузке может встретиться необходимость в добавлении к циркуляционной воде свежей холодной, на этот случай предусмотрены трубы *g* и *h*. Во время чистки охлаждающего аппарата или остановки электродвигателя насоса вода подводится через резиновый шланг *p*.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОПУСКАЕМЫХ НАГРУЗОК ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ПРИ РАЗНЫХ ВЫБРАННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ.

Каждый тип выпрямителей обычно характеризуется той максимальной силой тока, при которой он может работать. С изменением рабочего напряжения допускаемая сила тока нагрузки определенным образом изменяется.

Типы выпрямителей, изготовляемые разными фирмами, приведены в таблице 48, в ней же указаны и максимальные силы токов.

Таблица 48.

Ф и р м а	Т и п	Сила тока, в амперах
ВЭО	PB 5	600
"	10	1200
BBC	GRZ 136	500
"	" 158	750
"	" 56	1100
"	" 1812	1600
"	" 812	2100
AEG	Gr. II	500
"	" III	1000
"	" IV	1500
SSW	" I	600
"	" II	1000
"	" III	1750
Bergmann	Cl. 1000	1000
"	2000	2000

Из таблицы этой мы видим, что количество типов у каждой фирмы невелико, и объясняется это тем обстоятельством, что один и тот же тип может быть применен для разных напряжений.

На рис. 252 приведены характеристики допустимых длительных нагрузок выпрямителей завода „Электросила“ при разных рабочих напряжениях.

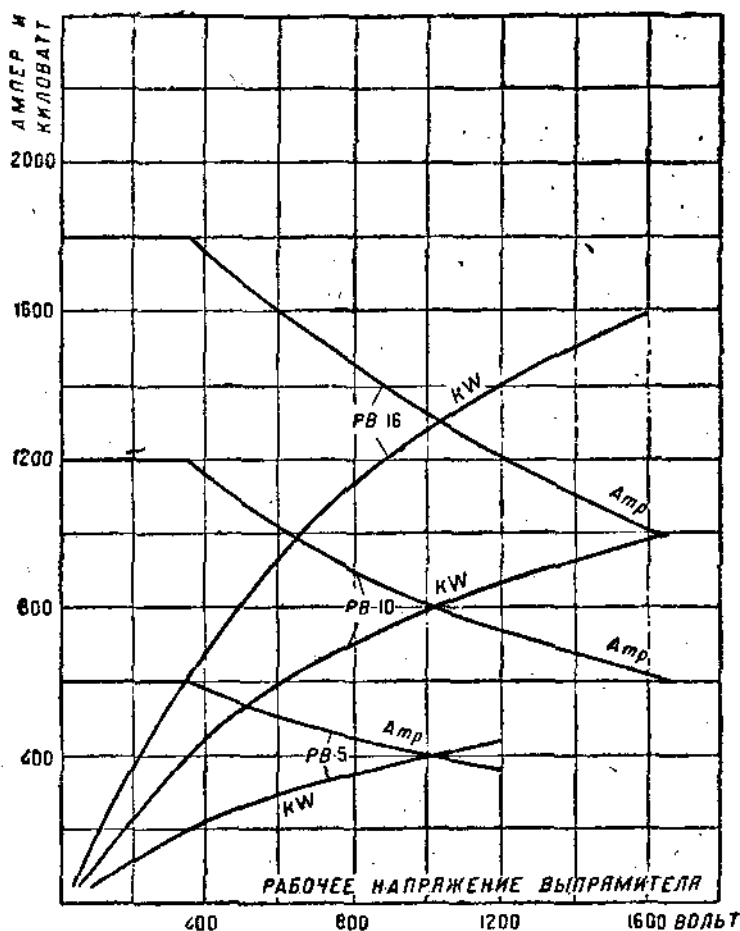


Рис. 252. Характеристики допустимых длительных нагрузок металлических ртутных выпрямителей завода „Электросила“ ВЭО при различных рабочих напряжениях.

С уменьшением рабочего напряжения сила выпрямленного тока увеличивается, — однако только до известного предела (горизонтальная часть кривых допускаемых токов), который зависит от размеров охлаждающей поверхности, анодов и т. д. Наоборот с повышением рабочего напряжения допускаемая сила тока уменьшается.

Подобные же характеристики для выпрямителей ВВС представлены на рис. 253,

В настоящее время существуют выпрямители металлической конструкции на высокие напряжения; так фирма ВВС выполнила установку на 4000 вольт. В лабораториях производятся опыты при напряжениях до 15 000 вольт.

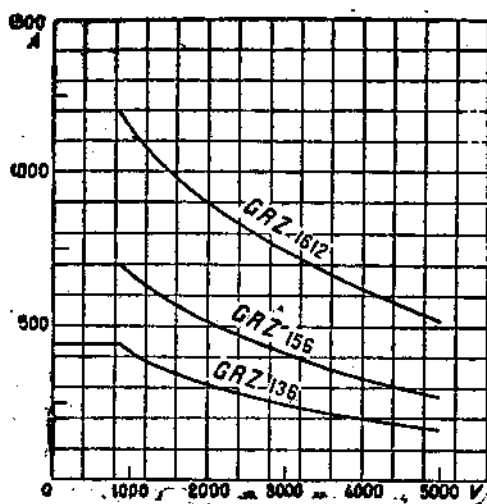


Рис. 253. Характеристики допустимых длительных нагрузок металлических ртутных выпрямителей фирмы ВВС при различных рабочих напряжениях.

Особый интерес при проектировании ртутно-выпрямительной установки представляет способность выпрямителей к перегрузкам. Кривая, характеризующая эту особенность некоторых типов выпрямителей фирмы ВВС, представлена на рис. 254.

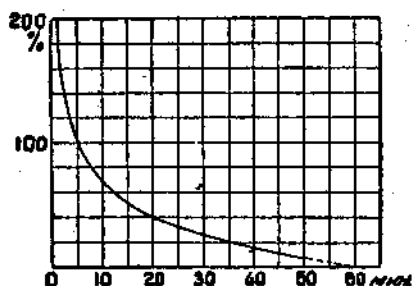


Рис. 254. Кривая способности к перегрузке металлических ртутных выпрямителей фирмы ВВС.

Примерно такими же кривыми характеризуется перегрузочная способность выпрямителей и других фирм.

Из нее видно, что выпрямители могут выдерживать кратковременные перегрузки, составляющие около 200% от рабочего тока.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА РТУТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.

В большинстве случаев на практике осуществляется параллельная работа двух или нескольких ртутных выпрямителей, но очень часто, например, при расширении подстанций или для снятия их нагрузки, бывает целесообразно приключать выпрямитель для общей работы с другими источниками постоянного тока, например мотор-генератором, одноякорным преобразователем, аккумуляторной батареей. При этом устойчивой совместной работы и желаемого распределения нагрузки между агрегатами, предназначенными для параллельного включения, достигают соответствующим подбором внешних характеристик.

Известно, что два агрегата с падающими (положительными) вольтамперными характеристиками будут работать вполне устойчиво, наоборот агрегаты с поднимающимися (отрицательными) характеристиками для параллельной работы не пригодны.

В этом можно убедиться из рассмотрения диаграмм на рис. 255. В первом случае (рис. 255, лев. часть) увеличение по какой-либо причине тока одного

из агрегатов вызывает, при неизменной общей нагрузке $I = I_1 + I_2$, уменьшение тока и увеличение напряжения второго агрегата, что приводит в результате к прежнему распределению нагрузки.

Во втором же случае (рис. 255, прав. часть) даже незначительное увеличение тока, например, первого агрегата, повлечет переход на него всей нагрузки.

Падение напряжения в дуге выпрямителя с увеличением нагрузки до нормальной величины несколько уменьшается, как это мы уже видели ранее. Можно считать, что при малых токах (по сравнению с нормальным) падение в дуге составляет около 25 вольт при нормальной нагрузке 18—22 вольт.

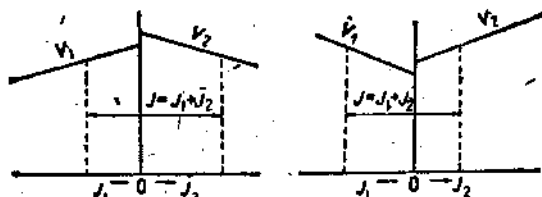


Рис. 255. Характеристики параллельной работы двух агрегатов.

Таким образом вольтамперная характеристика одного только выпрямителя при отсутствии влияния падения напряжения в трансформаторе и в линии передачи была бы поднимающейся. В реальных условиях эксплуатации на наклоне характеристики напряжения выпрямителя в значительной степени сказывается реакция трансформатора, линий передачи и даже генераторной станции, вследствие чего характеристика оказывается падающей. Понятно, чем мощнее генераторная станция и чем короче линия передачи, тем меньше будет влияние их реакции на напряжение выпрямительной установки.

Если по каким-либо причинам желательно увеличить наклон внешней характеристики ртутных выпрямителей, то достигнуть этого можно увеличением рассеяния трансформатора, а также включением реактивных катушек в цепь анодов или в первичную цепь.

Фирмой BBC применяется первый способ, другие же фирмы предпочитают анодные катушки.

В том случае, когда выпрямительная подстанция проектируется только на ртутных выпрямителях, последние обыкновенно выбираются однотипными.

Идентичность характеристик и надежность параллельной работы обеспечивается достаточной величиной тех реактивных сопротивлений, которые влияют на распределение нагрузки между агрегатами.

Так например, выбрав схему с питанием каждого выпрямителя от отдельного трансформатора, как это изображено на рис. 256, мы используем для достижения устойчивой параллельной работы полное рассеяние трансформатора.

Присоединяя же оба выпрямителя цилиндра к одному анодному трансформатору с разделенными вторичными обмотками (рис. 257), мы использовали бы для той же цели только рассеяние вторичных обмоток. Обе приведенные схемы

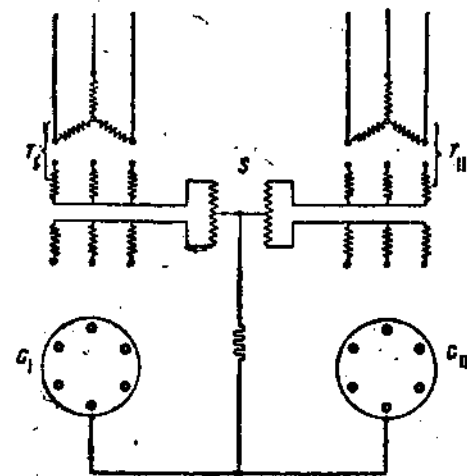


Рис. 256. Схема включения фирмы BBC двух параллельно работающих выпрямителей с отдельными трансформаторами.

принадлежат фирме ВВС, которая в большинстве своих типовых установок применяет междофазовые катушки.

Понятно, включая в схему с общим трансформатором не одну, а две междофазовых катушки, как это сделано на рис. 257, можно улучшить совместную работу анодов.

Наконец на рис. 258 приведена еще одна схема параллельного включения двух выпрямителей, предлагаемая американской фирмой GEC, с анодными реактивными катушками.

Существуют еще и другие схемы включения выпрямителей для параллельной работы.

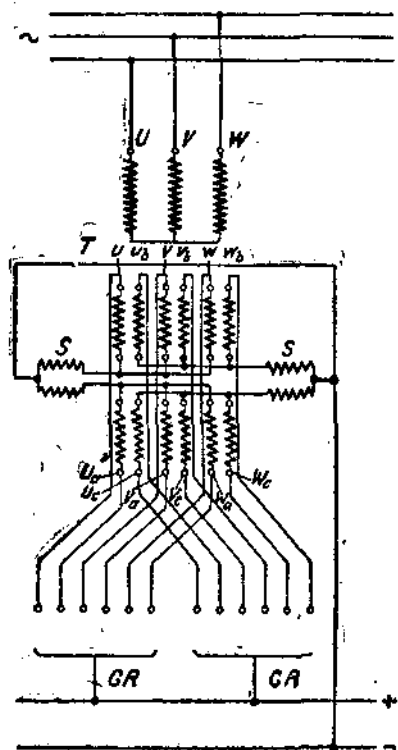


Рис. 257. Схема включения фирмы ВВС двух параллельно работающих выпрямителей с одним общим трансформатором.

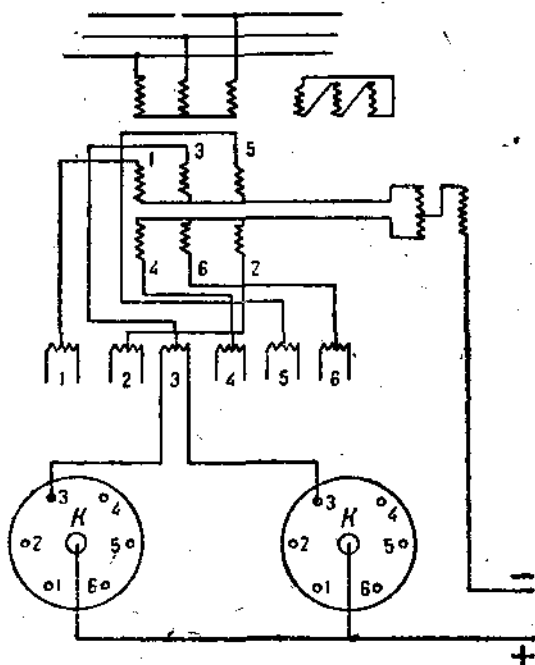


Рис. 258. Схема фирмы GEC параллельного включения двух шестифазных выпрямителей с анодными реактивными катушками.

Из них приведем одну оригинальную схему, предлагаемую фирмой ВВС (рис. 259), а именно, соединение вторичной обмотки трансформатора многоугольником. Она может быть применена вместо схемы с удвоенными вторичными обмотками, которая обладает тем недостатком, что, по данным фирмы ВВС, требует строго-синусоидального напряжения в сети, чего во многих случаях не бывает.

Что касается вопроса о выборе схемы с питанием каждого выпрямителя от отдельных трансформаторов или с общим трансформатором для группы выпрямителей, то его разрешают всякий раз в зависимости от экономических и эксплуатационных соображений (графика нагрузки, максимальной мощности установки, размеров помещения). Следует однако заметить, что экономическая

выхода группового питания не всегда оказывается значительной. Обмотка трансформатора усложняется; для обеспечения устойчивой работы параллельно приключенных анодов требуется, как было указано, повышение их рассеяния или же введение в цепь анодов реактивных катушек; в случае аварии трансформатора выбывают оба выпрямителя (больше двух в группу не включают), это обстоятельство может потребовать увеличения мощности резервных агрегатов. Все это ведет к удорожанию и даже усложнению установки. Поэтому в последнее время предпочитают индивидуальное питание выпрямителей вместо группового.

Параллельная работа ртутного выпрямителя с одноякорным преобразователем или мотор-генератором достигается без особых затруднений соответствующим подбором их внешних характеристик. В известных пределах на распределение нагрузки между выпрямителем и мотор-генератором можно повлиять изменением напряжения мотор-генератора с помощью регулировочного реостата в цепи возбуждения генератора, а со стороны ртутного выпрямителя с помощью потенциального регулятора или ступенчатого трансформатора.

К. п. д. выпрямителя очень высок и мало изменяется с нагрузкой, напротив отдача мотор-генератора или одноякорного преобразователя сравнительно низка при малых нагрузках. Поэтому из экономических соображений бывает часто желательно осуществить совместную работу выпрямителя, положив, с одноякорным преобразователем, таким образом, чтобы на основную (фундаментальную) нагрузку работал преобразователь, а пики нагрузки снимал бы ртутный выпрямитель. Для осуществления

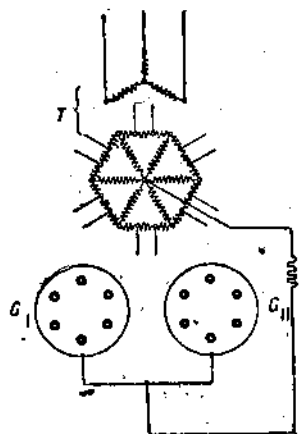


Рис. 259. Схема фирмы ВВС параллельного включения двух выпрямителей с одним трансформатором, у которого вторичные обмотки включены многоугольником.

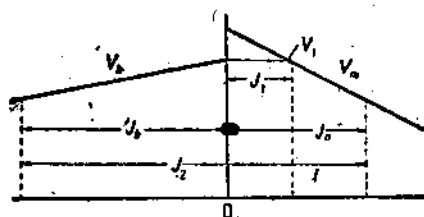


Рис. 260. Диаграмма распределения нагрузки при совместной работе вращающегося преобразователя с ртутным выпрямителем, снимающим пики нагрузки.

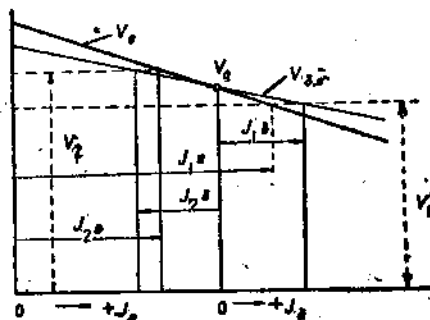


Рис. 261. Диаграмма совместной работы ртутного выпрямителя и буферной батареи.

такой работы на общие шины приключают выпрямитель с пологой внешней характеристикой и преобразователь с крутым наклоном характеристики. В таком случае, как это видно на рис. 260, ртутный выпрямитель вступит в работу только при нагрузке I_1 , соответствующей напряжению на шинах V_1 вращающегося преобразователя, и при дальнейшем увеличении нагрузки выпря-

митель, вследствие меньшего наклона характеристики, возьмет на себя большую часть нагрузки по сравнению с вращающимся преобразователем.

Наконец рассмотрим еще работу ртутного выпрямителя с буферной аккумуляторной батареей, снимающей пик нагрузки и заряжающейся при нагрузках меньших определенной.

Для пояснения приведена диаграмма на рис. 261. При напряжении на шинах V_0 подает ток только выпрямитель. Когда напряжение на шинах подстанции, вследствие увеличения нагрузки, понизится до величины V_1 , станет течь ток и батареи. Общий ток в сети будет:

$$I_c = I_{1a} + I_{1b}.$$

Во время малых нагрузок в линии напряжение на шинах поднимется до V_2 , батарея будет заряжаться.

Нагрузочный ток при этом будет:

$$I_c = I_{2a} + I_{2b}.$$

Характеристики и емкость батарей подбираются с таким расчетом, чтобы ток от выпрямителя не превосходил допустимой для него величины и чтобы количество энергии, запасенной батареей при зарядке, было достаточно для покрытия пика нагрузки.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ РТУТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.

Напряжение со стороны постоянного тока у ртутных выпрямителей, так же как и у одноякорных преобразователей, находится в определенной зависимости от напряжения переменного тока. Поэтому регулирование напряжения производится осуществлять только со стороны переменного тока. Надобность в регулировании напряжения встречается главным образом при питании от выпрямителя осветительных установок. В тяговых и крановых установках регулирование напряжения обычно не производится. Регулирование может быть достигнуто разными способами: 1) дополнительными выводами в трансформаторе, 2) добавочным ступенчатым трансформатором, 3) потенциальным регулятором.

1. Дополнительные выводы у трансформатора делают для регулировки напряжения в сравнительно узких пределах, обычно в пределах (5—10%). Регулировка производится скачками.

Выводы устраивают на стороны высокого напряжения и не более двух—трех, так как добавочные выводы увеличивают стоимость трансформатора. Применяется этот способ главным образом для регулировки небольших выпрямителей со стеклянными колбами.

2. Регулирование ступенчатым трансформатором можно производить в довольно широких пределах. Для ознакомления со схемой включения ступенчатого трансформатора приведем схему фирмы SSW (рис. 262).

Нулевая точка непосредственно на вторичной стороне трансформатора отсутствует, вторичные обмотки имеют 12 выжимов: 6 из них соединяются с анодами, а другие 6 идут к средним точкам регулировочного трансформатора.

Первичная обмотка последнего питается от главного трансформатора. Каждая фаза вторичной обмотки соединяется с контактами *КВ*. По этим контактам может перемещаться широкая щетка *В*, которая одновременно перекрывает 6 контактов. Эта щетка образует нейтральную точку и приключается к отрицательной шине постоянного тока. Если щетка находится в положении, указанном на рис. 262, то весь регулировочный трансформатор будет включен, и 6 проводов, идущих от 6 фаз главного трансформатора, окажутся соединенными в одну нулевую точку.

Если передвинем щетку на один контакт вниз, то к одной фазе вторичной обмотки главного трансформатора будет подведено напряжение регулировочного трансформатора, и поэтому на пять анодов выпрямителя будут поданы одинаковые напряжения от вторичных обмоток, а шестой анод окажется под другим напряжением, несколько большим или меньшим номинального вторичного напряжения. От этого соответственным образом увеличится или уменьшится напряжение выпрямленного тока.

Если передвинем щетку на одно из крайних положений, то напряжение каждой из шести фаз будет изменено в ту или другую сторону на определенную величину. Это положение будет соответствовать наибольшему увеличению или уменьшению напряжения выпрямителя.

Из сказанного ясно, что при других промежуточных положениях щетки нагрузка отдельных анодов будет несимметрична, что нежелательно, поэтому фирма SSW применяет этот способ для регулировки напряжения в небольших пределах $\pm 5\%$, однако другие фирмы применяют ступенчатый трансформатор для регулирования напряжения в более широких пределах.

Ступеней регулировки может быть несколько: 12, 18, 25.

Возбуждение добавочного трансформатора можно осуществить и от другого источника переменного тока.

Щетка имеет предварительный контакт, чтобы при переходе со ступени на ступень отдельные секции трансформатора замыкались через сопротивление, которое конструктивно соединено со щеткой.

Вследствие большого числа выводов ступенчатый трансформатор выполняется „сухим“, только с воздушным охлаждением.

При регулировании в одну сторону на $p\%$ мощность регулировочного трансформатора:

$$P_p = \frac{P_{Tp} p}{100} \text{ kVA,}$$

где P_{Tp} — мощность в kVA главного трансформатора.

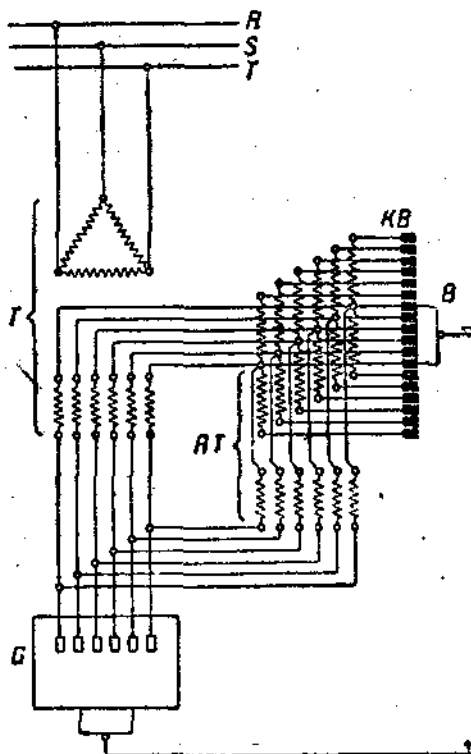


Рис. 262. Схема фирмы SSW регулирования напряжения ртутного выпрямителя при помощи ступенчатого трансформатора.

Если желательно регулирование в обе стороны на $\pm p\%$, то:

$$P_p = \frac{1,5P_{Tnp}}{100} \text{ kVA.}$$

Преимущество такого способа регулировки — дешевизна.

3. Регулирование напряжения потенциальным регулятором применяется главным образом в тех случаях, когда является необходимость осуществить плавное регулирование, а также для регулирования в широких пределах. Но этот способ дороже предыдущего. Мощность потенциального регулятора составляет $p\%$ от мощности главного трансформатора при регулировании на $\pm p\%$ в обе стороны.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ.

ЗАЩИТА РТУТНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ.

1. Общие замечания.

Конструктивные меры борьбы с обратными зажиганиями, рассмотренные в главе II этой части, имеют свою цель не допускать коротких замыканий внутри выпрямителя и носят следовательно предупредительный характер. Но если обратное зажигание по каким-либо причинам все-таки возникло, то необходимо ликвидировать его возможно скорее и притом без вреда для выпрямителя и без нарушения питания линии

постоянного тока. Применяемые в электротехнике автоматы обыкновенного типа справиться с этой задачей не могут, в виду сравнительной медленности их действия.

Выясним подробнее те последствия, которые влечет за собой обратное зажигание, появившееся в одном из двух или в одном из целой группы выпрямителей, работающих на общие шины (схема рис. 263). Пусть авария произошла в выпрямителе А. Тогда вторичные обмотки его трансформатора окажутся замкнутыми накоротко через дугу, и кроме того вся мощность от здорового выпрямителя устре-

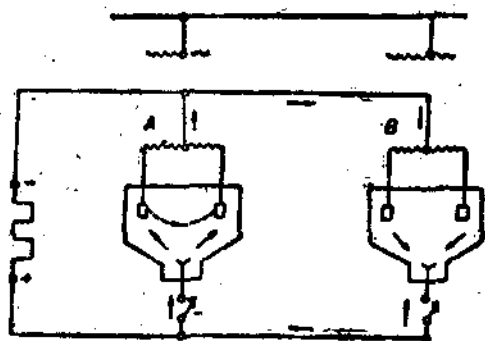


Рис. 263. Схема распределения токов при коротком замыкании в одном из группы выпрямителей, работающих на общие шины.

мится через проводящую в обоих направлениях газовую среду аварийного выпрямителя к нейтральной точке трансформатора В, минуя внешнюю нагрузку.

Ток короткого замыкания очень быстро, гораздо быстрее, чем смог бы проавести выключение максимальный автомат с реле мгновенного действия, возрастет до опасной величины, ограничиваемой активными и реактивными сопротивлениями в выпрямителе, трансформаторе и со стороны линии передачи. Поэтому при коротких линиях передачи, мощных генераторных станциях и отсутствии реакторов кратность мгновенного тока короткого замыкания может быть очень значительна. Это обстоятельство поведет к недопустимой перегрузке здорового выпрямителя, быстрому повышению в нем давления ртутных

ларов и обратному зажиганию внутри его. Из работы выйдет и второй агрегат. Нормальная работа установки нарушится.

Таковы последствия возникновения короткого замыкания в одном из рабочих агрегатов, с которыми долгое время не могли бороться, и это было серьезным недостатком ртутно-выпрямительных установок. И только лишь с появлением быстродействующих автоматов оказалось возможным успешно ликвидировать эти нежелательные явления.

Быстродействующие аппараты производят выключение настолько быстро, что сверхтоки не успевают достигнуть своих предельных значений. В этом мы можем убедиться, рассматривая осциллограммы на рис. 264, представляющие кривые изменения токов в одной и той же накоротко замыкаемой цепи при выключении помощью обыкновенного автомата (кривая *a*) и быстродействующего (кривая *b*).

Полное время выключения, под которым мы будем подразумевать время, протекающее от начала короткого до потухания дуги размыкания, для автоматов нормального типа, установленных на мгновенное действие (без выдержки времени), составляет в среднем около 0,1 — 0,2 сек.

При быстродействующем выключении это время сокращается до 0,01 — 0,025 сек, т. е. выключение производится примерно в десять раз быстрее.

На рис. 264 через t_0 обозначен тот момент времени, когда начинает действовать механизм выключателя, оно примерно одно и то же для выключателей обоих типов. Но у нормального выключателя контакты начинают разъединяться в момент t_0 , после чего ток быстро падает до нуля в связи с увеличением длины и сопротивления дуги размыкания.

Начало разъединения контактов у быстродействующего автомата происходит значительно раньше, в момент t_b , после чего ток еще некоторое время возрастает, однако с уменьшенной крутизной; затем сопротивление дуги быстро увеличивается, благодаря магнитному дутью и быстрому расхождению контактов выключателя, вследствие чего кривая тока начинает загибаться книзу.

Благодаря быстродействующему выключению уменьшается опасность нагрева элементов установки, кроме того динамические усилия, развивающиеся в токонесущих частях, обмотках трансформатора и т. п., не смогут достигать своих предельных значений. Если поместить такой быстродействующий аппарат в положительный провод каждого выпрямителя, как это показано на рис. 263, то приблизительно через 1/300 секунды после начала обратного зажигания в одном из выпрямителей работающей группы он будет отключен и остальные агрегаты будут продолжать работать, приняв на себя нагрузку поврежденного выпрямителя. Работа установки не нарушится. В этом заключается идея селективной (избирательной) защиты ртутных выпрямителей.

Ниже мы приведем несколько основных схем селективной защиты, но прежде познакомимся в кратких чертах с принципом действия и устройством быстродействующих автоматов некоторых заводов.

2. Принцип действия быстродействующих автоматов постоянного тока.

Большой скорости выключения при помощи быстродействующих автоматов удалось достигнуть крайним уменьшением инерции подвижных элементов вы-

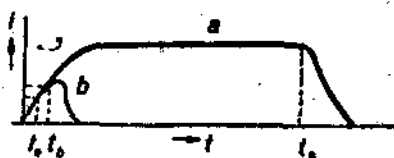


Рис. 264. Осциллограммы токов короткого замыкания при выключении с помощью обыкновенного и быстродействующего автоматов.

ключателя, большой силой пружин, производящих выключение и наличием мощных искрогасящих приспособлений. Значительные трудности представляла также разработка конструкции контактов и зацеплений.

Подобные автоматы были построены впервые в Америке фирмой GEC и имели своей задачей защищать однофазные преобразователи от так называемого кругового огня, возникающего при значительных перегрузках и коротких замыканиях в сети постоянного тока.

В Европе постройкой быстродействующих выключателей занялось несколько фирм — AEG, SSW и др. Первые выключатели фирмы AEG в конструктивном отношении близки к американским.

Воспользуемся схемой автомата фирмы AEG, изображенной на рис. 265, для пояснения принципа его действия.

Катушка H электромагнита M питается от источника постоянного тока. Электромагнит притягивает якорь K , преодолевая при этом сопротивление сильной пружины P , оттягивающей якорь в противоположную сторону. С якорем соединен подвижной рычаг, который прижимается к контактным щеткам. Между полюсами электромагнита расположен железный сердечник, исполняющий роль магнитного шунта к якорю.

Путь тока выпрямителя легко проследить по схеме: он проходит через рычаг выключателя, главные контактные щетки, искрогасительную катушку N , затем ток разветвляется на две части, одна часть обтекает катушку L , а вторая обмотку на сердечнике S , и наконец ток выходит из автомата. Если автомат предназначен для защиты работающего агрегата от тока короткого замыкания в сети, то магнитный поток катушки в якоре должен быть направлен противоположно потоку удерживающей катушки H . Действие автомата в случае аварии в сети будет заключаться в том, что при определенной величине тока короткого замыкания поток катушки S настолько ослабит поток, создаваемый удерживающей катушкой, что пружина оттянет якорь с рычагом и разомкнет контакты автомата.

Рис. 265. Схема устройства быстродействующего автомата фирмы AEG.

Во время короткого замыкания индуктивное сопротивление катушки L заставит большую часть потока направиться в якорь.

Изменяя воздушный зазор между ярмом S и железом электромагнита, легко можно регулировать силу того тока, при котором начинается действие автомата.

Следует еще обратить внимание на то обстоятельство, что благодаря магнитному взаимодействию между катушками H и S в период нарастания тока короткого замыкания в катушке H будет индуцироваться ток, поток которого поддержит и усилит действие катушки S главного тока.

Из сказанного следует, что с увеличением скорости нарастания аварийного тока будет также возрастать скорость выключения автоматом.

В том случае, когда автомат предназначен для выключения обратного тока, его магнитная система поляризуется на обратный ток.

Сопротивление W , шунтирующее главные контакты, защищает установку от перенапряжений, могущих возникнуть при выключении.

3. Быстродействующий автомат завода „Электросила“.

Автомат обратного тока советского производства (рис. 266) по своему устройству отличается от только-что рассмотренной конструкции.

На трехкernовом железном сердечнике имеются три обмотки: включающая 6, удерживающая 5 и главного тока 4.

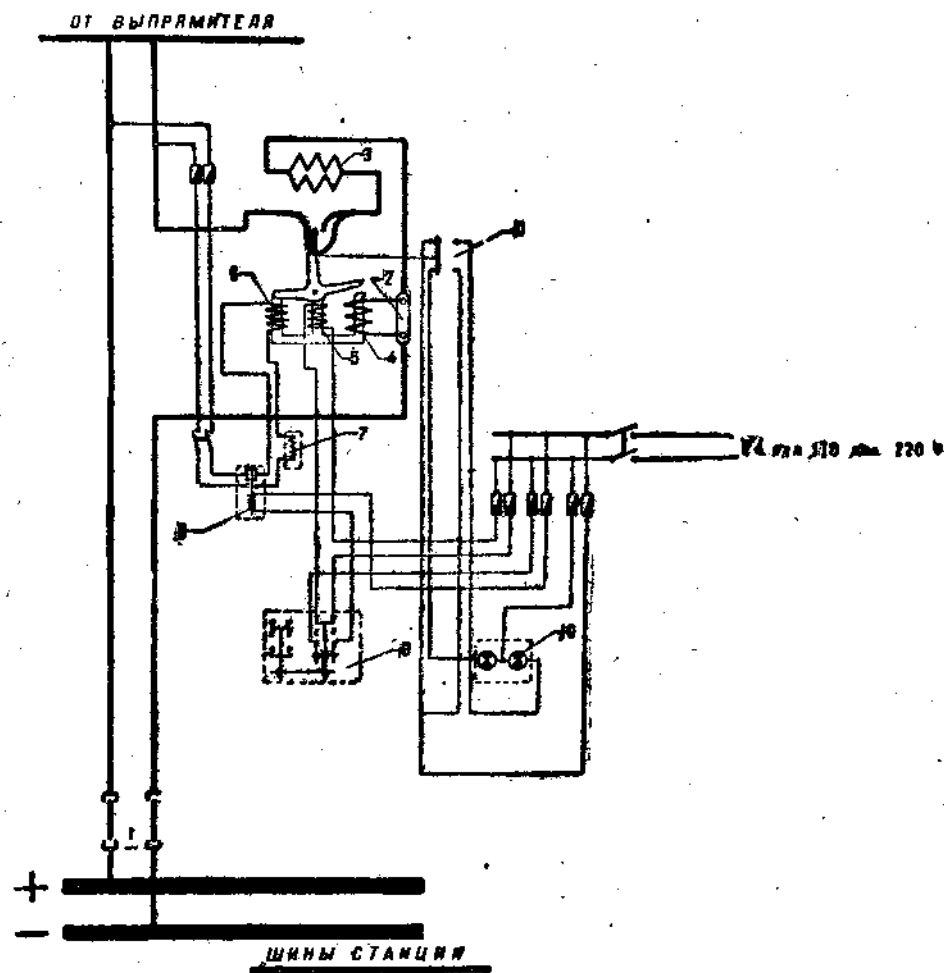


Рис. 266. Схема быстродействующего автомата обратного тока завода „Электросила“ ВЭО

На оси, закрепленной на среднем сердечнике, может свободно качаться якорь с контактами.

В левое положение включения якорь приводится совместным действием включающей и удерживающей катушек, после чего включающая катушка при помощи кнопочного контактора отключается. Поток катушки главного тока и среднем сердечнике совпадает с направлением потока удерживающей катушки,

— а в крайнем ему противоположен. По достижении главным током своей предельной величины его поток полностью размагничивает левый сердечник, и якорь с большой скоростью переключается в правое положение, выключающее главный ток. Удерживающая катушка питается от источника постоянного тока

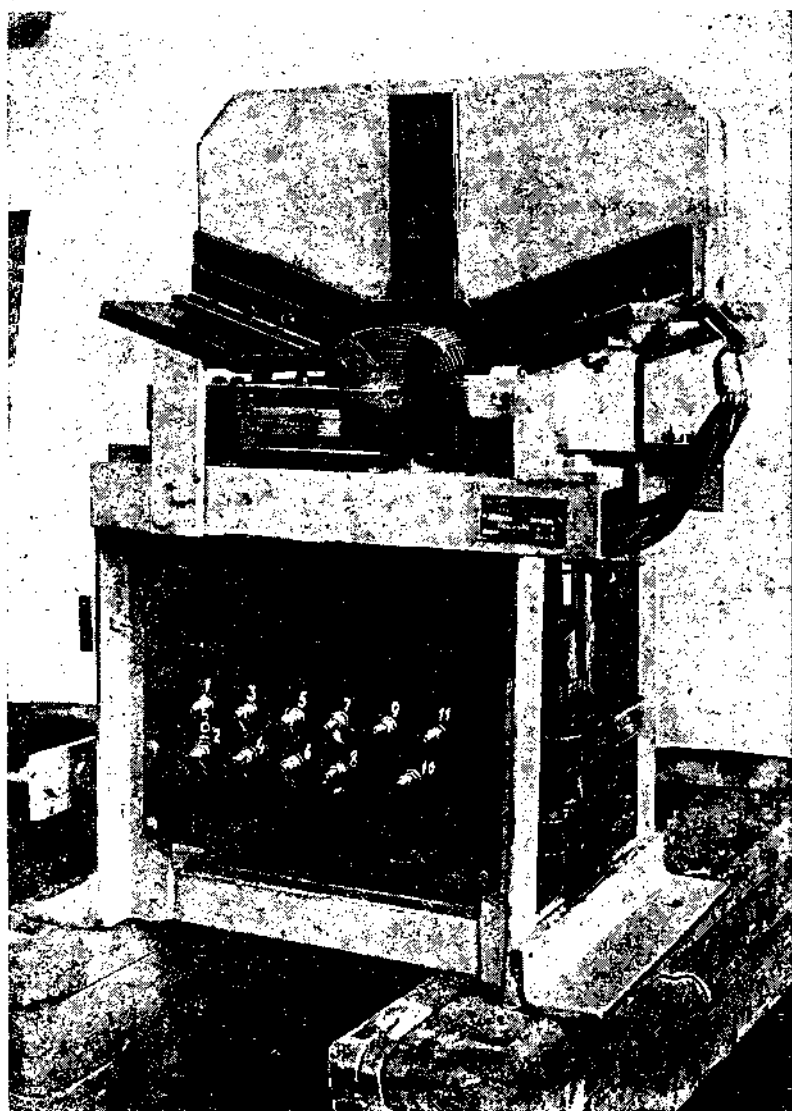


Рис. 267. Внешний вид автомата обратного тока завода „Электросила“ ВЭО.

(лучше всего аккумуляторной батареей, сохраняющей постоянство напряжения) и потребляет при 110 вольтах 0,2 ампера. По желанию заказчика эта обмотка может быть выполнена на другие напряжения постоянного тока.

Включающая катушка, потребляющая 15 ампер при 110 вольтах, может

питаться от выпрямителя через добавочное сопротивление. Регулировка выпо-
чающей силы тока возможна в пределах от номинальной до двухкратной.

Автомат может служить как для выключения прямого, так и обратного
тока. Внешний вид автомата изображен на рис. 267.

4. Схемы селективной защиты ртутных выпрямителей.

Задача селективной защиты параллельно работающих ртутных выпрями-
телей, как мы только что выяснили, сводится к тому, чтобы как со стороны
постоянного, так и со стороны переменного тока выключался только тот вы-
прямитель, у которого случилось обратное зажигание и притом без нару-
шения работы неповрежденных агрегатов. Одна из схем, выполняющих по-
ставленную задачу, приведена на рис. 268а.

Быстродействующий автомат, установленный на обратный ток, помещен в
минусовый провод выпрямителя. В положительном же проводе находится нор-
мальный автоматический выключатель и перед трансформатором установлен

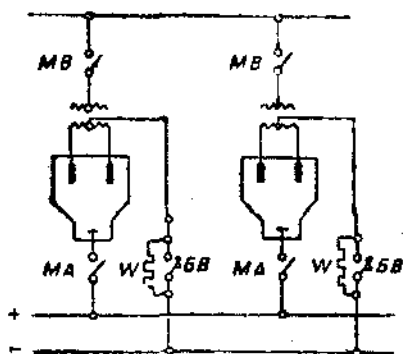


Рис. 268а.

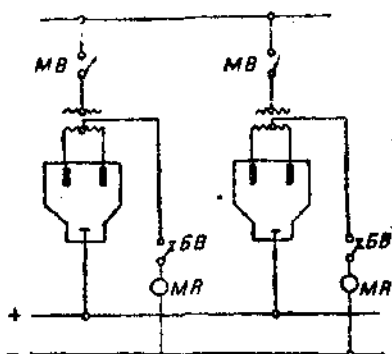


Рис. 268б.

Принципиальные схемы селективной защиты ртутных выпрямителей.

масляный выключатель. Оба автомата снабжены реле перегрузки с независимой
или с зависимо ограниченной от тока выдержкой времени.

Выдержка времени не должна быть больше $\frac{1}{4}$ или $\frac{1}{5}$ сек., вследствие боль-
шой скорости выключения быстродействующих автоматов.

Нормальные автоматы произведут отключение только при коротком замы-
кании в сети постоянного тока или в трансформаторе. Быстродействующий
выключатель реагирует только на ток короткого замыкания обратного направ-
ления. Выключая, он одновременно замыкает вспомогательные контакты и этим
производит отключение автомата МА, после чего прерывается остаточный ток,
протекавший через ограничительное сопротивление W.

Таким образом по этой схеме защита осуществляется как со стороны по-
стоянного, так и со стороны переменного тока и притом от токов короткого
замыкания прямого и обратного направления. Более простой и дешевый способ
защиты представлен на рис. 268б. Здесь отсутствует сопротивление W и вы-
ключатель в плюсовом проводе; вместо последнего имеется в отрицательном
проводе реле перегрузки с независимой или ограниченно зависимой выдержкой
времени. В случае короткого замыкания на шинах постоянного тока это реле
приведет в действие быстродействующий автомат, разъединя обмотку удержи-

яющей катушки или шунтируя ее накоротко. Такая схема возможна только в том случае, если перенапряжения при выключении не могут быть значительны.

Еще более упрощенную схему применяет завод „Электросила“ (рис. см. 270).

Быстродействующий выключатель и масляный со стороны переменного тока не связаны между собой. Первый реагирует на обратный ток, второй снабжен максимальным реле мгновенного действия и выключает трансформатор при перегрузке.

Наконец особого внимания заслуживают две схемы селективной защиты ртутных выпрямителей фирмы ВВС. Мы не останавливались на описании выключателей обратного тока этой фирмы, в виду сравнительной сложности их устройства. Они представляют собою комбинированную систему автоматического выключателя, реле максимального и реле обратного тока.

На рис. 269а и 269б приведены две схемы селективной защиты ВВС.

Первая из них применяется для схем с междупазовой катушкой, вторая — при вторичных обмотках трансформатора, соединенных зигзагом.

По схеме 269а защита дифференциальной типа. В цепь отсасывающей (междупазовой) катушки включено сопротивление, к которому присоединены выключающие катушки автоматов постоянного и переменного тока. В нормальных условиях работы выпрямителя падения напряжения между средней точкой сопроти-

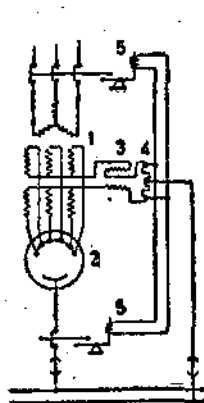


Рис. 269а.

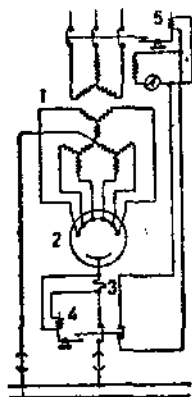


Рис. 269б.

Схемы селективной защиты ртутных выпрямителей фирмы ВВС.

вращения и крайними зажимами взаимно уравновешиваются. В случае повреждения в выпрямителе падения станут различными и выключающие катушки быстро выключат автоматы со стороны постоянного и переменного токов.

Во втором случае (рис. 269б) от шунта 3 питается быстродействующее реле обратного тока. Как только ток от здоровых выпрямителей устремится в выпрямитель, в котором произошло обратное зажигание, реле произведет выключение в положительном проводе и одновременно разомкнет цепь, шунтирующую трансформатор тока, от которого питается электромагнит масляного выключателя, и последний выключается.

Масляные выключатели устанавливаются на минимальную выдержку времени, достаточную для осуществления селективности системы.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ.

СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ РТУТНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ.

1. Общие соображения.

В настоящее время наиболее распространенными являются ртутно-выпрямительные установки, обслуживаемые вручную, но с частичной автоматизацией некоторых функций управления, вследствие чего их можно назвать полуавтоматическими. Такие выпрямительные подстанции, кроме обычной защиты транс-

форматора, снабжаются рядом приспособлений, при помощи которых, например, регулируется подача свежей воды (тепловое или электрическое реле), автоматически действуют вакуумные краны, производится пуск форвакуумного насоса, когда давление в форвакуумном резервуаре достигло своего предельного значения, кроме того такие установки снабжаются еще системой звуковой и световой сигнализации, имеющей целью предупредить персонал станции о появлении опасных дефектов в работе установки, грозящих ей остановкой, и известить его о случившихся повреждениях.

Достоинства подобных подстанций вполне очевидны: повышая надежность работы установки, они вместе с тем облегчают работу обслуживающего персонала, расходы же, связанные с частичной автоматизацией схемы, сравнительно невелики.

Наконец фирмами BBC, AEG и другими строятся полностью автоматизированные подстанции, однако число их еще невелико, что объясняется сложностью аппаратуры таких установок.

Обслуживающий персонал на автоматических подстанциях отсутствует, управление работающими агрегатами выполняется системой реле и вспомогательных механизмов. Таким путем кроме вышеперечисленных производятся следующие операции: включение и выключение выпрямителей при изменении нагрузки, переключение одного из выпрямителей в случае аварии на запасный агрегат, поддерживается определенное напряжение на шинах постоянного тока, производится полное выключение подстанции в случае отсутствия нагрузки и т. д. Мы рассмотрим только полуавтоматические установки, как наиболее распространенные.

При разработке схем ртутно-выпрямительных установок должно быть уделено достаточное внимание следующим вопросам:

- 1) выбору типа выпрямителей и схемы питания,
- 2) обеспечению устойчивой параллельной работы с другими генераторами постоянного тока, если в этом встречается необходимость,
- 3) регулированию напряжения на шинах постоянного тока,
- 4) селективной защите установки от токов короткого замыкания,
- 5) питанию током вспомогательных механизмов (шины местных нужд),
- 6) разработке общей схемы установки.

Обычно каждый выпрямитель питается от отдельного трансформатора; это повышает надежность работы всей установки и обеспечивает возможность правильной защиты установки от коротких замыканий.

Качество схемы определяется типовой мощностью трансформатора, коэффициентом мощности в линии и падением напряжения со стороны выпрямленного тока.

При описании конструкций отдельных фирм приводились принципиальные схемы питания. В приводимой же ниже таблице имеются некоторые опытные данные, характеризующие схемы различных фирм с вышеуказанной точки зрения.

Сравнение схем в электромагнитном отношении сделано в главе II, поэтому здесь не будем останавливаться на этом вопросе.

Сделаем только лишь одно замечание практического характера относительно схемы с отсасывающей катушкой. В том случае, если по каким-либо причинам нежелательно или даже опасно резкое повышение рабочего напряжения при нагрузках меньших критической, параллельно нагрузке подключают балластное сопротивление, рассчитанное так, чтобы общий ток нагрузки был не ниже 2% от номинального. При главном токе выше критического это сопротивление отключается, что может производиться автоматически.

ТАБЛИЦА 49.

Схема питания	A	B	C	D
Фирма или завод	1. Завод „Электросила“ (ВЭО) 2. Фирма BBC 3. „ AEG	1. Фирма BBC (основная схема)	1. Фирма SSW 2. Завод („Электросила“) (ВЭО)	1. Фирма SSW 2. Фирма Bergmann (основная схема)
1. Падение напряжения со стороны выпрямленного тока	6—8%	4—5% на рабочем участке внешней хар-ки	Внешняя хар-ка почти такая же, как и у схемы B	10—12%
2. Средняя типовая мощность трансформатора	1,43 P_g	1,26 $P_g + 0,13 P_g$	1,33 P_g	1,55 P_g
3. Коэффициент мощности в линии	0,9—0,93	0,9—0,93	—	0,88—0,91

2. Схема завода „Электросила“ (ВЭО).

Схема электрических соединений выпрямительного агрегата завода „Электросила“ изображена на рис. 270.

От шин высокого напряжения кабели через треншалтеры и масляный выключатель подходит к анодному трансформатору. Масляный автомат устанавливается на мгновенное выключение без выдержки времени.

От трансформатора ток подводится к выпрямителю, при этом изоляция соответствующих кабелей должна быть взята значительно выше, чем это требуется рабочим напряжением выпрямителя. Это требование объясняется тем обстоятельством, что при внезапном потухании дуги или быстром сбрасывании нагрузки могут возникнуть серьезные перенапряжения в цепи вследствие освобождения электромагнитной энергии. Присутствие в схеме фирмы BBC еще добавочной отсасывающей реактивной катушки усиливает степень возможных перенапряжений. Поэтому указанная фирма применяет при 600 вольтах кабели с изоляцией на 3000 вольт, при напряжениях постоянного тока в 1650 вольт кабели с изоляцией на 6000 вольт. Примерно в такой же степени усиливается изоляция кабелей и всех цепей, потенциально связанных с цилиндром выпрямителя, в установках, выполняемых ВЭО. Для этой же цели защиты от перенапряжений рекомендуется применение роговых разрядников во вторичных цепях трансформатора, включаемых между фазой и нулем трансформатора.

Шины местных нужд питают: трансформатор возбуждения (0,8 kVA), ртутный насос (0,3—1 kVA), форвакуумный насос (1,2 kVA) и реле сигнализационного устройства.

На рис. 270 слева показана схема сигнализации. Оптические и звуковые сигналы извещают о появлении следующих дефектов в работе установки:

1) в случае отсутствия достаточного количества проточной воды (водяное реле),

2) при повышении температуры корпуса выпрямителя свыше 42° (контактный термометр),

3) при ухудшении вакуума свыше 12 р (12×10^{-3} мм ртутного столба),

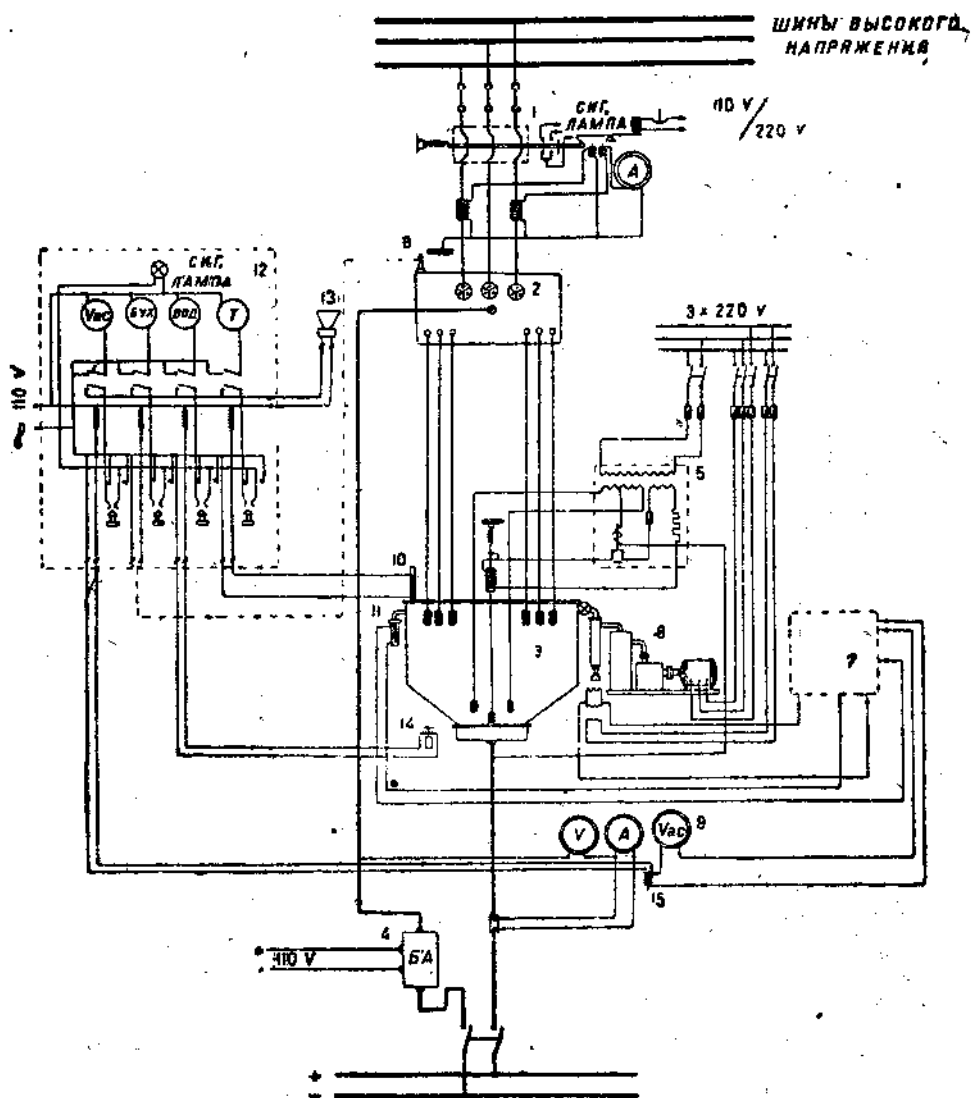


Рис. 270. Схема включения ртутно-металлического выпрямительного агрегата завода „Электросила“ ВЭО.

4) при повреждении питающего трансформатора (сигнал принимается от реле Бухгольца).

Как только замкнутся контакты, связанные с соответствующим элементом установки, электромагниты на сигнальном щитке (сигнальном табло) замкнут в свою очередь два контакта в цепи источника переменного тока, при этом

верхний из них замыкает цепь лампы, а нижний контакт — цепь акустического сигнала, общего для всех реле установки.

После того, как звуковой сигнал будет услышан обслуживающим персоналом, нажимается кнопка - переключатель, которая разрывает цепь гудка и

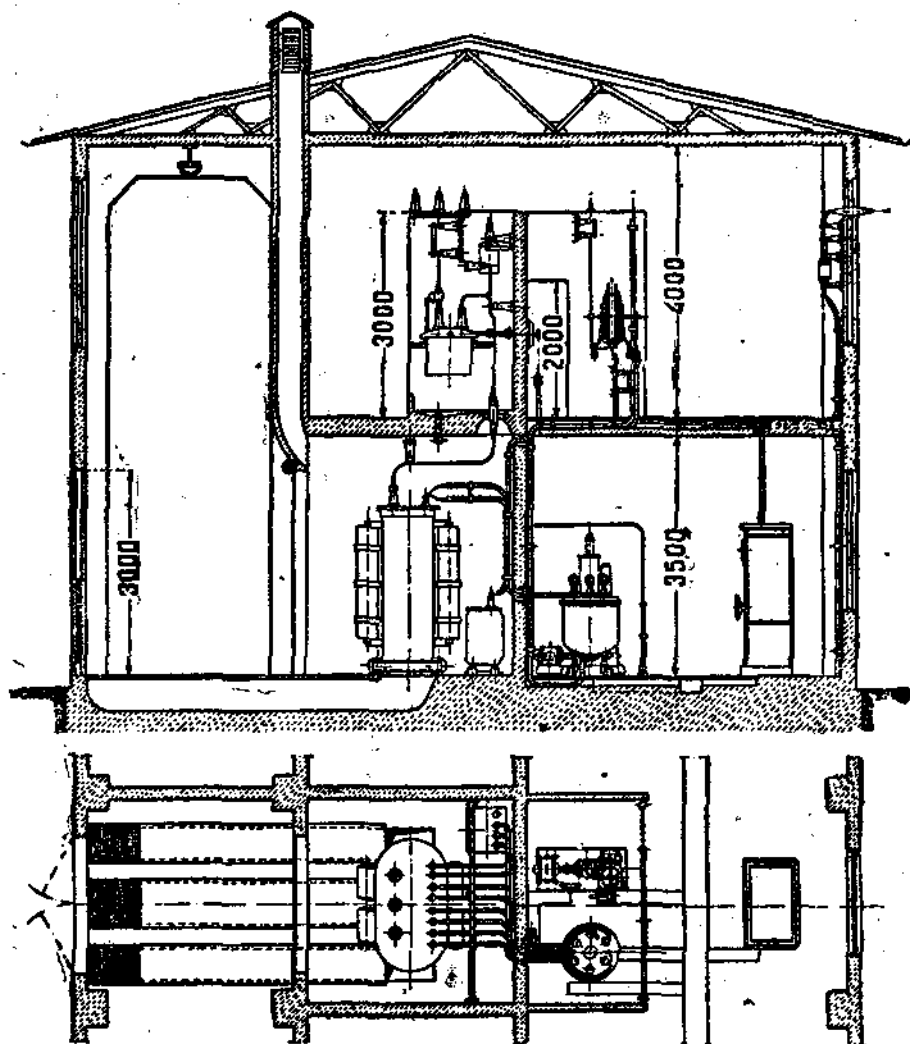


Рис. 271. План и разрез типовой выпрямительной двухэтажной подстанции фирмы ВВС.

одновременно вместо него замыкает цепь красной сигнальной лампы. Таким переключением дается возможность акустическому сигналу реагировать на другие повреждения, могущие возникнуть во время ремонта случившегося повреждения. Сигнальная лампа, указывающая причину сигнала, продолжает гореть до тех пор, пока причина его не устранена. Красная же лампа остается гореть

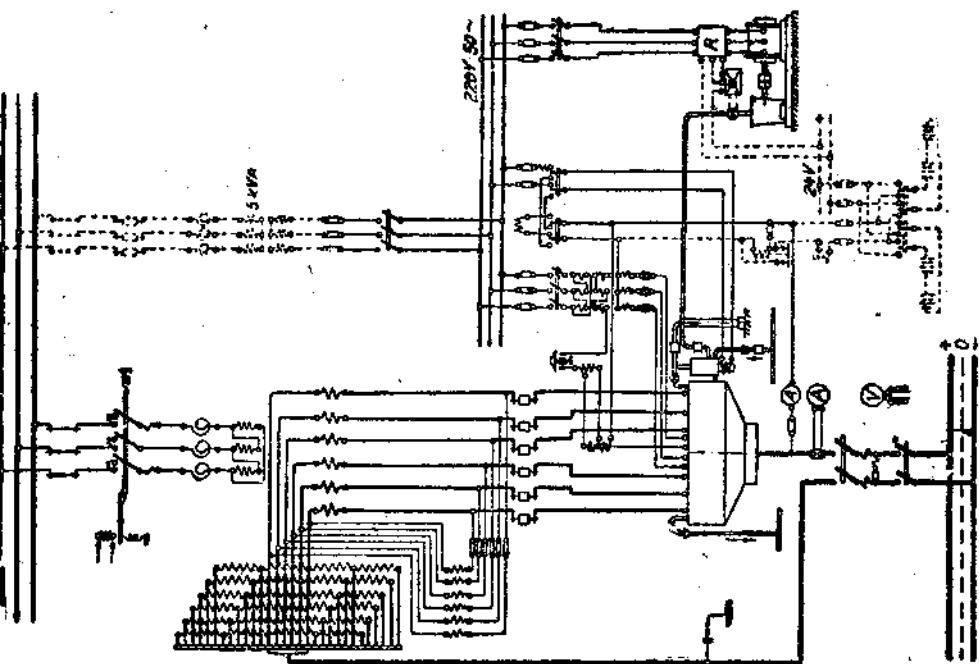


Рис. 272б. Типовая схема включения ртутно-металлического выпрямительного агрегата фирмы SSW.

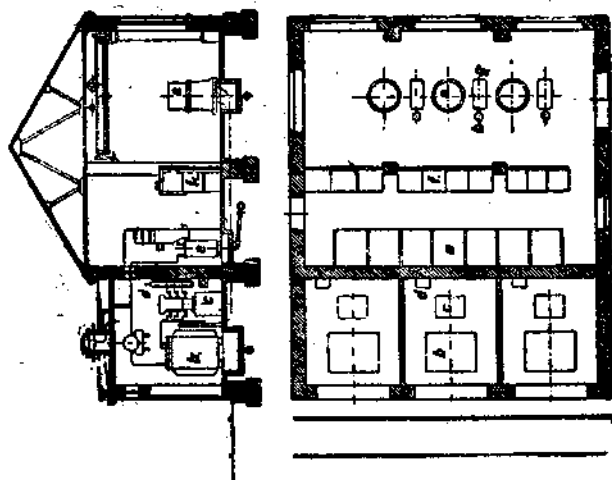


Рис. 272а. План и разрез типовой выпрямительной одностанционной подстанции фирмы SSW.

до тех пор, пока кнопка-переключатель после устранения дефекта не будет вытянута.

Питание всей сигнализационной установки производится от вспомогательных шин на 110 V или при отсутствии таковых от автотрансформатора.

Мощность, потребная для одновременной работы двух реле, около 60 VA.

После разработки схемы проектируется здание подстанции.

На рис. 271 показаны план и разрез типовой подстанции фирмы BBC.

В качестве примера одноэтажной подстанции приведен план и разрез установки фирмы SSW на рис. 272а. Типовая схема включения выпрямителей фирм SSW приведена на рис. 272б.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ (КЕНОТРОНЫ)

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

ОСНОВЫ РАБОТЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ.

1. Общая характеристика работы выпрямителя.

Способность накаливаемого тела терять электрический заряд широко использована техникой в многочисленных и разнородных пустотных приборах. Электронные лампы с высоким вакуумом и двумя электродами, накаливаемым катодом и холодным анодом, получили название двухэлектродных или кенотронов. Первой такой лампой был „вентиль Флеминга“, построенный Флемингом в 1904 г. Электрический ток через электронную лампу идет от накаливаемого катода (минус) к холодному аноду (плюс) [по общепринятому представлению ток идет от анода к катоду]. В обратном направлении ток через такой прибор не проходит, так как второй электрод — холодный (имеет низкую температуру, при которой практически не происходит испускания электронов). В настоящее время кенотроны строятся начиная от малых мощностей и напряжений и кончая большими мощностями, порядка 100 kW, и высокими напряжениями, порядка 250 kV.

Механизм прохождения тока через кенотрон заключается в следующем.

Накаливаемое до высокой температуры тело катода испускает электроны, которые, выйдя из тела катода (под влиянием больших тепловых скоростей), увлекаются электрическим полем между катодом и анодом, проходят через пустоту, попадают на анод и затем через внешнюю цепь могут возвращаться на катод.

Электроны, вышедшие из катода, некоторое время находятся в пространстве между катодом и анодом, и затем попадают на анод. Как известно, сила тока определяется количеством электричества, прошедшим через поперечное сечение в единицу времени. Определим, какое количество движущихся электронов находится в кубическом сантиметре пространства между катодом и анодом, если известны сила тока и напряжение на аноде. Скорость электрона v определится из ур-ня:

$$\frac{1}{2} m v^2 = e V, \quad (227)$$

где v — скорость в см/сек, m — масса электрона, e — заряд электрона, V — пройденная разность потенциалов; отсюда, подставляя численные значения, получаем $v = 5,95 \times 10^7 \sqrt{V}$ см/сек.

¹ В этой формуле, строго говоря, следовало бы заменить m через $\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, где

m_0 — покоящаяся масса, а c — скорость света. Приводимая формула является приближенной, так как не учитывает поправки на принцип относительности (изменение массы электрона от скорости). Поправкой пренебрегаем, так как нас интересует в данном случае только порядок величины.

Сила тока i через 1 см^3 поперечного сечения определится, как это не трудно показать:

$$i = nev_{\text{ср}}, \quad (228)$$

где i — сила тока через 1 см^3 , n — число электронов в единице объема (1 см^3),

$v_{\text{ср}} = \frac{v}{2}$ — средняя скорость электронов,

и, следовательно, пространственная (средняя) плотность электронов:

$$n = \frac{i}{e2,974 \times 10^7 \sqrt{V}}. \quad (229)$$

Следует отметить, что из ур-ня (228) вытекает, что тот же самый электронный ток может осуществляться либо при большой плотности n электронов и их малой скорости $v_{\text{ср}}$ (или малом напряжении) либо при малой плотности и больших скоростях. Очевидно, что первый случай экономичнее, так как требует меньшей затраты энергии на поддержание тока.

Электронный поток обладает кинетической энергией — живой силой движущихся электронов. В момент достижения электроном анода электрон отдает свою энергию аноду, так как при этом происходит удар: кинетическая энергия электрона превращается в тепловую, в результате чего анод нагревается. Это явление получило название электронной бомбардировки. Таким образом потерянная мощность в выпрямителе выделяется в виде тепла на аноде.

Время, в течение которого электрон проходит от катода к аноду, определяется его скоростью и расстоянием между электродами. Так например, при напряжении на аноде 10 вольт и расстоянии между электродами 1 см время пробега определится в

$$t' = \frac{1}{2,974 \times 10^7 \sqrt{10}} = 1,063 \times 10^{-8} \text{ сек}, \quad (230)$$

а при том же расстоянии, но при напряжении 1000 вольт:

$$t' = 1,063 \times 10^{-9} \text{ сек.}$$

В первом случае времени пробега $t' \cong 10^{-8}$ сек соответствует период электромагнитной волны, имеющей длину волны $\lambda = 3,0 \text{ м}$, а во втором случае для $t' \cong 1,0 \times 10^{-9} \text{ сек}$ — $\lambda = 0,3 \text{ м}$.

Таким образом время пробега очень мало, и при выпрямлении даже высоких частот практически можно считать, что электрон проходит от катода к аноду почти мгновенно, или во всяком случае можно считать, что за время его пути электрическое поле между анодом и катодом постоянно.¹ Электрический ток, проходящий через выпрямитель практически не обладает инерцией и строго следует за всяким изменением разности потенциалов между катодом и анодом, при чем запаздывания не происходит до высоких частот порядка длины волны $\lambda = 300 \text{ м}$. При более коротких волнах, очевидно, с временем пробега электрона уже нужно как-то считаться. Действительно при напряжении на аноде $V = 10$ вольт и при периоде меньшем $\lambda = 2 \text{ м}$ очевидно, что электрон, вышедший из катода к аноду, не успеет за одну половину периода дойти до анода. На этом вопросе останавливаться подробнее не будем.

¹ См. М. М. Ситников „Ионные процессы и некоторые их техническое использование“ Труды Г. Ф. Т. Л. Н. Т. У., № 7, вып. № 282, стр. 26, 1928 г.

В гл. III, 6, ч. I было выведено уравнение (17), отвечающее этому случаю. Это уравнение:

$$i = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} \sqrt{\frac{\epsilon}{\pi}} \frac{V^{3/4}}{x^4} \quad (231)$$

дает максимальное значение тока между двумя параллельными электродами с расстоянием x между ними при разности потенциалов V .

2. Объемный заряд между плоскими электродами.

Ограничение в величине тока происходит вследствие объемного заряда в пространстве между анодом и катодом. Для полного прекращения тока нужно, очевидно, чтобы электроны, вышедшие из катода и имеющие начальные скорости порядка 1—2 вольт, встречали со стороны электрического поля вблизи самого катода противодействие, т. е. чтобы электрическое поле вблизи катода имело отрицательное (кривая с рис. 273) значение. На рис. 273 представлены кривые: a — распределения потенциала между двумя холодными электродами, b — при накаливаемом катоде, объемном заряде, при отсутствии тока и c — при токе, ограниченном объемным зарядом.

Подставляя в формулу (231) численные значения для $\frac{\epsilon}{\pi}$, получаем следующую расчетную формулу:

$$i = 2,33 \times 10^{-6} \frac{V^{3/4}}{x^4}, \quad (232)$$

где i — максимальный ток в А/см².

Действительная характеристика (зависимость тока i от напряжения V) имеет в начале несколько другую кривизну, отличающуюся от теоретической кривой (по уравнению 232), что объясняется начальными скоростями электронов, которыми для малых напряжений на аноде пренебрегать уже нельзя. Верхний загиб кривой определяется ограничением тока уже не объемным зарядом, а недостатком эмиссии катода, причем характеристика переходит в кривую тока насыщения. Формула (232) показывает, что чем меньше расстояние x между электродами, тем меньшая требуется разность потенциалов между анодом и катодом для проведения того же тока. Поэтому в кенотронах стремятся делать расстояние между электродами возможно меньшим. Но уменьшению расстояния препятствуют многие другие причины, прежде всего конструктивные трудности (провисание катода), а также то обстоятельство, что второй электрод (анод) должен быть так помещен, чтобы он не нагревался значительно через лучеспускание от катода, так как кроме такого нагревания он испытывает еще нагревание от электронной бомбардировки, при которой все потери анодной цепи трубки выделяются в виде тепла на аноде. Обычно катод выполняется в виде V- или W-образной проволоки, накаливаемой током между двумя плоскими поверхностями анода.

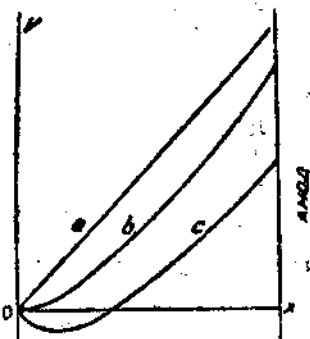


Рис. 273. Распределение потенциала между плоскими электродами

3. Объемный заряд между цилиндрическими электродами.

Только в последнее время экономические соображения заставили разрабатывать и изготавливать кенотроны с плоскими анодами, имеющие лучший к. п. д.,

но в техническом отношении представляющие большие трудности в изготовлении сравнительно с цилиндрическими. До последнего же времени кенотроны изготовлялись преимущественно с цилиндрическими электродами. Рассмотрим явление ограничения тока объемным зарядом для случая цилиндрических электродов.

Уравнение Лапласа для этого случая в системе цилиндрических координат будет:

$$\Delta V = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) = 4\pi\rho,$$

или

$$- \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) = 4\pi\rho r, \quad (233)$$

а уравнение (15-а) для данного случая примет вид:

$$i = 2\pi r \rho v, \quad (234)$$

где i — ток на единицу длины катода, r — радиус, на котором потенциал равен V .

Решая оба эти уравнения, имеем:

$$r \frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{dV}{dr} = i \sqrt{\frac{2m}{eV}}. \quad (235)$$

Лангмюир дает приближенное решение этого уравнения:

$$i = \frac{2V\sqrt{2}}{9} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{V^{3/4}}{r\beta^3}, \quad (236)$$

где функция β имеет значение от 0 до 1 и выражается следующим образом

$$\beta = \gamma - \frac{1}{6}\gamma^2 + \frac{11}{120}\gamma^3 - \frac{47}{3300}\gamma^4 + \dots, \quad (237)$$

где

$$\gamma = \log \frac{r}{r_0}, \quad (238)$$

где r_0 — радиус внутреннего электрода.

В таблице 50 даны значения для β .

Таблица 50.

$\frac{r}{r_0}$	β^3	$\frac{r}{r_0}$	β^3
1,00	0,000	5,0	0,755
1,25	0,042	6,0	0,818
1,50	0,120	7,0	0,867
1,75	0,202	8,0	0,902
—	—	9,0	0,925
2,00	0,279	10,0	0,941
2,50	0,405	15,0	0,981
3,00	0,512	20,0	0,99999
4,00	0,665	∞	1,000

¹ Langmuir. Phys. Rev. (2), 2, 450, 1913.

В практических случаях обычно

$$\frac{r}{r_0} > 20, \quad (239)$$

функция $\beta=1$, и поправкой можно пренебречь. Подставляя численные значения в уравнение (236), получаем расчетную формулу:

$$i = 14,65 \times 10^{-8} \frac{V^{3/2}}{r^{3/2}} \cong 14,65 \times 10^{-8} \frac{V^{3/2}}{r}, \quad (240)$$

дающую значение тока i в амперах на 1 см длины катода, ограниченного объемным зарядом при разности потенциала V (в вольтах) между электродами и радиусе r (в см) внешнего электрода (анода).

Как показали Чайльди-Лангмюр, максимальное значение тока, независимо от формы и конфигурации электродов, пропорционально напряжению в степени $3/2$:

$$i = k\varphi \left(\frac{r}{r_0} \right) V^{3/2}, \quad (241)$$

где k — постоянная зависящая от формы электродов, $\varphi \left(\frac{r}{r_0} \right)$ — функция расстояния между электродами.

Отклонения от закона степени $3/2$, наблюдаемые на практике, происходят потому, что при выводе формулы (243) не были приняты во внимание: начальные скорости, магнитное поле катода, падение напряжения вдоль нити и др.

Сказанное относительно плоских электродов относится и к цилиндрическим электродам.

4. Влияние магнитного поля тока накала катода на его эмиссию.

Вокруг катода, по которому проходит ток накала, создается магнитное поле, которое, как известно, влияет на движение электрона. В мощных лампах, требующих мощных катодов, ток накала достигает иногда большой величины, и магнитное поле уже оказывает значительное действие на электронный ток между катодом и анодом. В предельном случае магнитное поле настолько отклоняет движущиеся к аноду электроны, что электроны возвращаются на катод, и ток в анодной цепи прекращается.

На рис. 274 дана траектория электрона, вышедшего с катода и вернувшегося обратно, описав сложную траекторию по циклонде. Магнитное поле в точке a (перпендикулярное плоскости

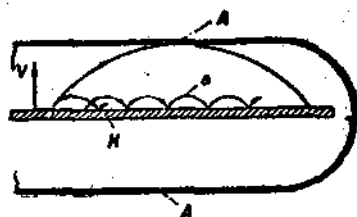


Рис. 274. Движение электрона под влиянием магнитного поля тока накала.

чертежа) перпендикулярно электрическому полю $\frac{dV}{dr}$, в результате чего элек-

трон отклоняется вправо (на рис. 274) и возвращается на катод. Очевидно, что если увеличить напряжение электрического поля (оставив прежние значения тока накала), электрон опишет большую циклонду, и при некотором значении напряжения $V_{кр}$ все же достигнет второго электрода — анода. Напряжение $V_{кр}$ назовем критическим напряжением.

Хэлл¹ дает следующую зависимость для критического напряжения, выведенную в предположении что электроны имеют начальную скорость равную нулю:

$$V_{кр} = 2 \frac{e}{\pi} I^2 \left(\log \frac{r}{r_0} \right)^2, \quad (242)$$

где I — ток накала.

Подставляя численные значения, имеем:

$$V_{кр} = 0,01876 I^2 \left(\log_{10} \frac{r}{r_0} \right)^2, \quad (242)$$

где I — в амперах, $\log_{10}$ — десятичный логарифм, r и r_0 — радиусы в см.

Средняя температура катода обычно порядка 2500°K , поэтому ток накала можно заменить (см. форм. 256) через радиус катода r_0 , и тогда формула (242) примет вид:

$$V_{кр} = 352\,000 r_0^2 \left(\log_{10} \frac{r}{r_0} \right)^2. \quad (243)$$

Численный пример. Пусть диаметр анода $2r = 5$ см, $r = 2,5$ см; диаметр нити $2r_0 = 0,1$ см, $r_0 = 0,05$ см. Тогда получаем для температуры катода 2800°K ток накала (по рис. 285) 54 ампера и:

$$V_{кр} = 0,01876 \times 54^2 \left(\log_{10} \frac{2,5}{0,05} \right)^2 = 152 \text{ вольт.}$$

Очевидно, что в случае накала катода переменным током магнитное поле около катода тоже переменное и может вносить искажения в величину анодного тока в продолжение части периода, когда магнитное поле имеет достаточную величину для отклонения электронов. Величина анодного тока в таком случае будет зависеть от разности фаз между токами накала и анодным током. Вообще говоря, эффект влияния магнитного поля катода на анодный ток нежелателен, и с целью его устранения принимаются различные меры. Например ослабляющее действие оказывает бифилярный или V-образный катод, когда магнитное поле от обеих половинок нити уменьшает друг друга.

Правда в некоторых случаях влияние магнитного поля может быть применено с пользой. Так в случае постоянного напряжения, приложенного между катодом и анодом, переменное магнитное поле катода будет то пропускать, то удерживать ток в анодной цепи, и таким образом можно получить генератор (и одновременно умножитель, так как за каждый период магнитное поле два раза задерживает электронный ток) или усилитель переменного тока. Такой эффект был получен и наблюдался Хэллем.² В целях борьбы с вредным действием магнитного поля, а также неоднородностью электрического потенциала вдоль по катоду, А. А. Чернышевым предложены особые эквипотенциальные катоды, подогриваемые изнутри другим катодом, или электронной бомбардировкой.

В настоящее время такие катоды получают все большее и большее применение, особенно в радиотехнике, в лампах приемных устройств.

Затруднение в применении кенотрона для высокого напряжения заключается в опасности деформации раскаленной нити под влиянием электростатических

¹ A. Hull, Phys. Rev., Vol. 25, 1925, 645.

² O. E. R., т. 26 стр. 31. Trans. A. I. E. E., т. 42, 1923, стр. 915.

спл. А. А. Чернышев предложил¹ окружить нить проволоками и приложить к ним гораздо меньшую разность потенциалов, все же достаточную, чтобы получить ток насыщения.

Б. Холостой ход, нагрузка и короткое замыкание выпрямителя.

На рис. 275 дана типичная характеристика выпрямителя для четырех значений температуры катода.

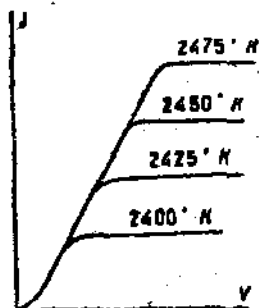
Ток насыщения тем больше, чем выше температура, а следовательно, и эмиссионная способность катода. Дальнейшее увеличение напряжения не увеличивает тока, так как все электроны, вышедшие с нити, достигают анода. Рабочий участок характеристики приближается к прямолинейному и чем круче характеристика, тем больше к. п. д. выпрямителя, так как меньше потери.

Рассмотрим, что происходит с выпрямителем, когда достигнут ток насыщения. На возрастающей части характеристики мы имеем почти прямолинейную зависимость между током и напряжением, так как сопротивление кенотрона изменяется мало. Если представить сопротивление кенотрона,

как частное от деления $\frac{V}{I_a}$, мы получим следующую зависимость, исходя из уравнения влияния объемного заряда в общем виде:

$$I_a = k \varphi \left(\frac{r}{r_0} \right) V^{1/2}, \quad (244)$$

$$R = \frac{V}{I_a} = \frac{1}{k \varphi \left(\frac{r}{r_0} \right) V^{1/2}}, \quad (245)$$



т. е. с увеличением напряжения сопротивление несколько уменьшается. Но после достижения тока насыщения, когда ур-ние перестает быть справедливым, происходит резкое изменение в работе выпрямителя.

Увеличение напряжения не вызывает увеличения тока, который остается постоянным и равным току насыщения, так как все электроны, испускаемые катодом уже использованы. Сопротивление кенотрона начинает возрастать прямо пропорционально напряжению. При этом электроны получают все большую и большую скорость и всю свою энергию выделяют на аноде, и могут разогреть его выше допустимой для него температуры. Как общее положение, кенотрон должен работать во всяком случае на возрастающем участке характеристики, и напряжение на нем не должно достигать, а тем более переходить за напряжение, при котором достигается ток насыщения.

Рассмотрим работу выпрямителя при увеличении его полезной нагрузки. Пусть вторичная обмотка трансформатора включена через выпрямитель на полезное сопротивление R_1 , которое может меняться от значения, практически равного бесконечности, до нуля (рис. 276).

Рассмотрим по отдельности, какое будет напряжение на кенотроне при одной и другой половинах периода переменного напряжения трансформатора.

За проводящую половину периода, когда на наклонном катоде минус, а

Рис. 275. Зависимость тока насыщения от температуры катода.

¹ „Вестник Рентгенологии и Радиологии“, Отдел Физико-Технический, том 1, в. 1, стр. 73, 1919 г. Доклад 5/XI 18 г

на аноде для напряжения, сопротивление кенотрона имеет небольшое сравнительно с внешним сопротивлением значение и сила тока во всей цепи определяется главным образом внешним сопротивлением.

Рассмотрим три следующих случая, когда внешнее сопротивление:

- 1) $R_1 = \infty$; 2) $\infty > R_1 > 0$; 3) $R_1 = 0$.

Случай 1-й. При достаточно большом внешнем сопротивлении ток будет очень мал (практически равен нулю) и падение напряжения на кенотроне будет практически равно нулю. Физическая картина явления заключается в том, что по мере возрастания положительной полуволны напряжения, электроны устремляются с катода на анод и все время нейтрализуют положительный заряд таким образом, что разность потенциалов между анодом и катодом близка к нулю, так как сила тока через кенотрон все время ограничена внешним большим сопротивлением. Если бы сила тока ограничивалась объемным зарядом внутри кенотрона, тогда бы на кенотроне была большая разность потенциалов. Но последнее явление возможно только при достаточном токе через кенотрон.

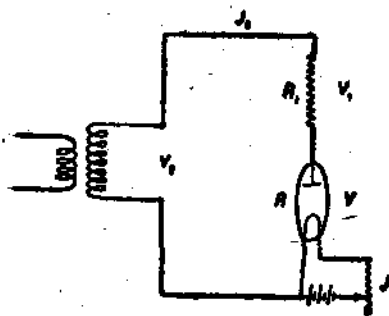


Рис. 276. Схема включения кенотрона.

За другую половину периода, при внешнем сопротивлении очень большом, сопротивление кенотрона, представляющего собой два электрода в пустоте, будет приближаться к бесконечности, и общее напряжение разделится на две части, пропорциональные внешнему сопротивлению и сопротивлению кенотрона. Если сопротивление кенотрона больше внешнего сопротивления, то на кенотроне напряжение будет больше, чем на внешнем сопротивлении, или в случае равенства сопротивлений

на кенотроне будет половинное напряжение. По мере приближения внешнего сопротивления к сопротивлению кенотрона (обратного напряжения) к бесконечности, напряжение будет делиться обратно пропорционально емкости (внутренней емкости анод — катод) кенотрона и емкости внешней цепи. Очевидно, что в зависимости от величины емкостей, напряжение на кенотроне может меняться в широких пределах (от нуля до полного напряжения). В действительных условиях, когда имеются и емкости и сопротивления, не равные бесконечности, в каждом конкретном случае этот вопрос решается различно.

Случай 2-й. При уменьшении сопротивления внешней цепи (полезная нагрузка) или при увеличении нагрузки ток I_a через выпрямитель определится общим сопротивлением, равным внешнему сопротивлению R_1 плюс сопротивление кенотрома R . Электронный ток, проходящий через кенотрон, создаст объемный заряд, который и определит падение напряжения V между анодом и катодом, согласно выведенным ранее формулам.

Сила тока I_a при напряжении трансформатора V_2 , внешнем сопротивлении R_1 определится из трех ур-ий:

$$I_a = \frac{V_1}{R_1}, \quad (246)$$

$$I_a = k\phi \left(\frac{r}{r_0} \right) V^{3/2}, \quad (247)$$

$$V_2 = V + V_1.$$

где V_1 — напряжение нагрузки, $k\varphi\left(\frac{r}{r_0}\right)$ — постоянная для данного кенотрона, определяемая либо по формулам (237) и (242) для объемного заряда, либо на опытной характеристике кенотрона.

Таким образом, увеличение тока через кенотрон увеличивает падение напряжения в кенотроне.

Вся мощность, теряемая в кенотроне и равная произведению тока на напряжение $P = I_a V$, выделяется в виде тепла на аноде. Поэтому анод кенотрона должен иметь достаточную поверхность, чтобы быть в состоянии излучить полученную мощность при сравнительно низкой температуре. Таким образом при увеличении нагрузки увеличивается падение напряжения в кенотроне и растет теряемая мощность. Максимальный допустимый рабочий ток определяется мощностью, которую может излучить анод. Ток насыщения обычно несколько превосходит максимальный допустимый рабочий ток.

За вторую половину периода очевидно все напряжение приходится на кенотрон, так как внешнее сопротивление нагрузки мало сравнительно с сопротивлением кенотрона.

Случай 3-й. По мере увеличения нагрузки, или уменьшения внешнего сопротивления, значение тока достигает тока насыщения. Дальнейшее уменьшение внешнего сопротивления не увеличивает тока. Падение напряжения на внешнем сопротивлении уменьшается прямо пропорционально уменьшению сопротивления: $V_1 = I_a R_1$, так как сила тока $I_a = I_s = \text{const}$. Что происходит в кенотроне? Очевидно, что если ток остается постоянным $I_a = \text{const}$ и общее подводимое напряжение $V_s = \text{const}$, то напряжение на кенотроне увеличивается, и происходит кажущееся увеличение сопротивления кенотрона. В момент короткого замыкания очевидно вся мощность цепи, равная $P = I_a V_s$, выделяется на аноде. Конечно ни один кенотрон такой перегрузки не выдержит, так как анод кенотрона не рассчитан на рассеивание такой большой мощности.

Определим для какого-нибудь конкретного случая, какая перегрузка при этом будет для кенотрона. Пусть выпрямляемое напряжение $V_s = 10\,000$ вольт, падение напряжения в кенотроне при $I_a = 200$ миллиампер будет $V = 400$ вольт. Потери выпрямителя при полной нагрузке:

$$I_a V = 0,2 \times 400 = 80 \text{ ватт,}$$

при коротком замыкании:

$$I_a V_s = 0,2 \times 10\,000 = 2000 \text{ ватт.}$$

Тот же характер перегрузки анода можно получить другим путем, который мы назовем „минным коротким“. Пусть кенотрон работает при токе, близком к току насыщения, но его не достигает. Не изменяя внешнего сопротивления, уменьшим ток накала кенотрона таким образом, чтобы ток эмиссии катода сделался меньше первоначального рабочего тока. Что при этом происходит? Ток очевидно установится равный току насыщения. На внешнем сопротивлении напряжение уменьшится в отношении уменьшения тока, а на кенотроне напряжение увеличится.

Рассмотрим минное короткое для некоторого конкретного случая. Пусть выпрямляемое напряжение $V_s = 10\,000$ вольт, рабочий ток 200 миллиампер, падение напряжения в выпрямителе 400 вольт; при этом падение напряжения на внешнем сопротивлении $10\,000 - 400 = 9600$ вольт. Потери в кенотроне: $0,2 \times 400 = 80$ ватт.

Уменьшив накал таким образом, чтобы ток насыщения был равен 100 миллиампер. Теперь на внешнем сопротивлении падение напряжения будет уже вдвое меньше $\frac{9600}{2} = 4800$ вольт, но за счет этого на кенотроне будет падение напряжения $10\,000 - 4800 = 5200$ вольт и потери в кенотроне: $0,1 \times 5200 = 520$ ватт.

Если взять ток насыщения меньше, например в 50 миллиампер, то аналогичный элементарный подсчет даст потери в кенотроне:

$$P = 0,05 \left[10\,000 - \frac{(10\,000 - 400) 0,050}{0,200} \right] = 380 \text{ ватт.} \quad (248)$$

Как не трудно показать, кривая потерь в кенотроне с уменьшением накала имеет максимум значения и потери во всяком случае много больше потерь при полной нагрузке и нормальном накале.

Таким образом, хотя „мнимое короткое“ дает потери несколько меньшие полного короткого ($P = 2000$), но все же и такие потери (520 ватт), превосходящие иногда во много раз $\left(\frac{520}{80} \cong 6,5 \right)$ нормальные потери (80 ватт), окажутся губительными для кенотрона.

Явление „мнимого короткого“ будет иметь место в момент выключения кенотронной установки, когда это выключение производится неправильно: в момент выключения тока накала, при невыключении анодного напряжения. Во время остывания катода на очень короткий промежуток времени (доли секунды) повторяются только-что рассмотренные явления. В мощных выпрямителях (это в равной мере относится и к лампам), имеющих ток накала в несколько десятков ампер, охлаждение происходит хотя и быстро, но все же некоторая добавочная мощность будет выделена на аноде в момент выключения, и, что особенно иногда неприятно, эта мощность будет выделена при напряжении, во много раз превосходящем нормальное напряжение в кенотроне. Отчасти этим, а также и другими обстоятельствами (повышение напряжения на кенотроне до значения выпрямляемого в положительном направлении — чего обычно при работе не бывает и др.) объясняются правила включения и выключения кенотрона, когда накал должен включаться и выключаться без анодного напряжения.

Поэтому, в целях обезопасить кенотрон от перегрузки, следует накал кенотрона увеличивать сколь можно больше (пределом является долговечность катода) и работать при перекале катода, но ни в коем случае нельзя работать при недокале катода.

6. Работа выпрямителя на другой электронный прибор (трубка Кулиджа и др.).

В рассмотренном нами случае работы кенотрона предполагалась омическая нагрузка, емкостная или индуктивная. В случае, когда кенотрон работает на нагрузку, представляющую собой тоже электронный прибор, поведение выпрямителя будет в некоторых случаях резко отличаться. Рассмотрим работу выпрямителя, питающего трубку Кулиджа. Кенотрон должен подвести высокое напряжение к трубке Кулиджа при сравнительно небольшом токе, таком, чтобы выделяемая в трубке Кулиджа мощность не превосходила допустимой величины. Кроме трубки Кулиджа, являющейся полезной нагрузкой, и кенотрона в цепи трансформатора нет других сопротивлений. Из работы выпрямителя и поведения

что при нагрузке, рассмотренного в предыдущем параграфе, непосредственно вытекает, что ограничением тока может быть только ток насыщения. Так как достижение тока насыщения в электронном приборе сопровождается увеличением падения напряжения, очевидно, что ток должен соответствовать току насыщения в трубке Кулиджа, а не в выпрямителе. В выпрямителе при этом накал катода должен быть таким, чтобы его ток насыщения был больше (значительно) тока, идущего через оба пустотных прибора. На рис. 277 дано схематическое изображение характеристик трубки Кулиджа и кенотрона. Рабочий ток I_a равен току насыщения I_s трубки Кулиджа и значительно меньше тока насыщения I_s кенотрона.

На рис. 277 показаны рабочие точки на характеристиках; одна точка для трубки Кулиджа: ток I_a , напряжение V_1 , полезная мощность $I_a V_1$ и другая точка для кенотрона: ток I_a , напряжение V , потери $I_a V$.

При работе выпрямителя на другой электронный прибор вопрос о том, как выгоднее работать с точки зрения безопасности кенотрона, при перекале катода или при нормальном накале, получает иное решение. Опасность для кенотрона будет тогда, когда по каким-либо причинам ток насыщения I_s трубки Кулиджа возрастет до величины большей тока I_a , так как сейчас же нагрузка перейдет с трубки Кулиджа на кенотрон и будет тем больше по абсолютной величине, чем больше было значение тока I_a . Так что с этой точки зрения следует накал выпрямителя иметь близким к нормальному, т. е. ток насыщения I_s должен немного превосходить допустимый рабочий ток кенотрона. Но с другой стороны, чем меньше будет ток I_a , тем чаще будут случаи, когда внезапное увеличение тока насыщения (например появление вспышки газа) в трубке Кулиджа уже будет достаточным, чтобы нагрузка перешла на кенотрон, в котором ток насыщения окажется меньше. Так что в данном случае, труднее дать общее заключение и в каждой конкретной установке этот вопрос должен находить самостоятельное разрешение.

За вторую половину периода, когда практически ток равен нулю, напряжение делится между кенотроном и трубкой Кулиджа пропорционально их сопротивлениям или при бесконечно большом сопротивлении обратно пропорционально их внутренним емкостям. Поэтому в каждом конкретном случае распределение напряжения будет различно.

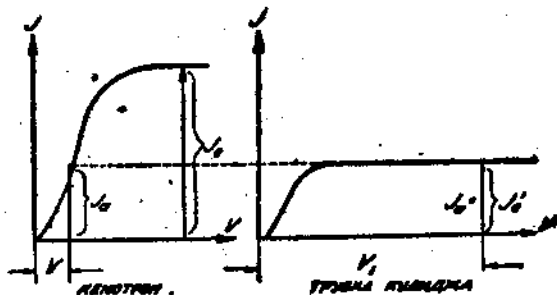


Рис. 277. Диаграмма работы кенотрона, включенного последовательно с другим электрошным прибором (трубкой Кулиджа).

7. Последовательное соединения электронных приборов и сложная схема выпрямления А. А. Чернышова.

Из рассмотрения рис. 277 следует, что при последовательном соединении электронных приборов нагрузка между ними распределяется в зависимости от их внутренних сопротивлений, или токов насыщения. Таким образом, изменяя накал электронных приборов, можно перевести нагрузку с одного на другой. Нагрузка будет больше там, где ток насыщения меньше.

Кенотроны в настоящее время готовятся до больших напряжений, но не превосходящих 250 кВ. Для выпрямления больших напряжений (порядка миллиона вольт и выше) А. А. Чернышовым предложена в 1926 г. сложная схема последовательного соединения кенотронов и особых сопротивлений.¹ Идея сложного выпрямителя А. А. Чернышова заключается в том, что на кенотроне за проводящий полупериод напряжение практически равно нулю, а за непроводящий полупериод напряжение равно полному напряжению, и если с зажимов последовательно включенных кенотронов брать напряжение, то оно практически будет одного знака. Схема выпрямителя А. А. Чернышова, изображенная на рис. 278, предназначена для питания сложной разрядной трубки для выпуска потока электронов наружу. Питание выпрямителя производится от трансформаторов, соединенных по схеме Дессауера.

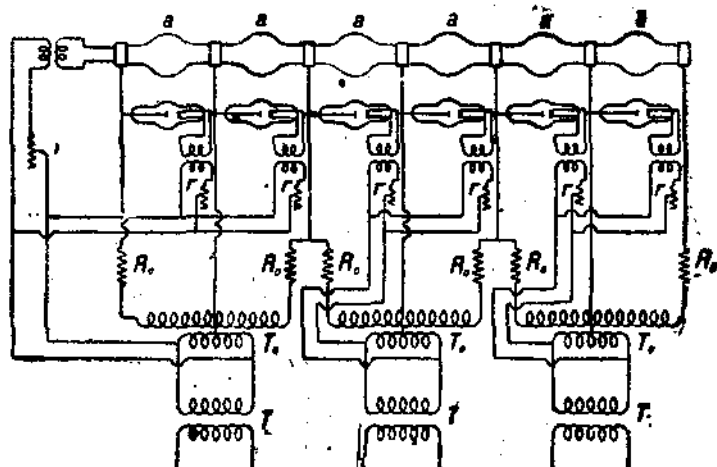


Рис. 278. Сложный выпрямитель на очень высокое напряжение по схеме проф. А. А. Чернышова.

Сопротивления R_0 — порядка 1,6 мегома. Ток через выпрямители — порядка 10 миллиампер, а через сложную шестисекционную трубку — порядка одного миллиампера. Выпрямленное напряжение — порядка миллиона вольт. Подробнее на этом вопросе останавливаться не будем.

ГЛАВА ВТОРАЯ РАСЧЕТ КАТОДА.

1. Типы катодов и общая характеристика материалов катода.

Источником электронов, служащих для переноса заряда, а вместе с тем и тока через выпрямитель, является нагретый до высокой температуры катод.

Катод стремятся делать из вещества, способного испускать электроны в достаточном количестве при возможно меньшей затрате мощности, идущей на

¹ Вестник экспериментальной и теоретической электротехники, № 4, апрель 1928 г., стр. 138. М. Лапирова-Скобко. Сложные катодные трубки и применение очень высокого напряжения.

накал катода. Эффективность работы катода (отдача катода) определяется отношением возможного тока эмиссии к затраченной на подогрев катода мощности и измеряется обычно в миллиамперах на ватт ($\epsilon \frac{\text{mA}}{\text{W}}$). С другой стороны к катоду предъявляются требования: надежности и постоянства работы, большого срока службы, стойкости от распыления поверхности ионной бомбардировкой и другие, которые находятся в противоречии с основными требованиями хорошей отдачи.

В настоящее время основными типами катодов являются катоды из следующих материалов: вольфрама, торированного вольфрама, карбидированного торированного вольфрама и затем специальные сложные катоды с нанесенным на тот или другой материал слой окиси щелочных металлов. Последние катоды получили название окисных или азидных, различающихся между собой по способу изготовления. И наконец катоды в парах цезия. Кроме того катоды на различных материалах имеют различные границы по величине употребляемого минимального диаметра проволоки.

Катоды из вольфрама, хотя и обладают наименьшей отдачей или удельной эмиссией ($\frac{\text{mA}}{\text{W}}$), до настоящего времени находят большое применение, так как они обладают исключительными надежностью и постоянством и хорошим сроком службы. Кратко укажем характеристику материалов, из которых изготавливается катод, и перейдем к расчету чисто вольфрамового катода, имеющего наибольшее применение.

По величине удельной эмиссии в $\frac{\text{mA}}{\text{W}}$ катоды располагаются в следующем порядке: вольфрам 5—15 $\frac{\text{mA}}{\text{W}}$, торированный вольфрам 35—40 $\frac{\text{mA}}{\text{W}}$, карбид-вольфрам (торированный) 70—90 $\frac{\text{mA}}{\text{W}}$, окислы 40—90 $\frac{\text{mA}}{\text{W}}$, азиды 100—300 $\frac{\text{mA}}{\text{W}}$ и вольфрам в парах цезия до 1000 $\frac{\text{mA}}{\text{W}}$. Указанные цифры относятся к общей отдаче катода, принимая во внимание потерю в отдаче вследствие охлажденных концов нити около вводов. Идеальная отдача в средней части катода значительно выше, и ее значение для торированной нити будет дано в дальнейшем (гл. IV, 1). Дадим общую характеристику катодам, выполненным из различных указанных выше материалов.

Материалом для вольфрамового катода служит чистый вольфрам с небольшой (около 0,5%) примесью тория (для того, чтобы он не был чрезмерно хрупким). Вольфрамовый катод обладает исключительным постоянством работы, употребляется при температуре от 2500°K до 2800°K, в зависимости от диаметра нити, и обладает хорошим сроком службы.

Торированный вольфрамовый катод имеет примесь тория к вольфраму около 1,0—1,5%; и такая примесь уже существенно меняет свойства нити в смысле очень резкого увеличения испускания электронов при пониженной температуре в интервале от 1900°K до 2200°K, причем при температуре от 2500°K до 2800°K электронная эмиссия нити остается примерно такой же, как и для чистого вольфрама. Ток эмиссии такого катода зависит от состояния поверхности нити в отношении густоты покрытия ее атомами тория, и только при правильной эксплуатации такой катод дает постоянство работы. Кроме того такой катод очень резко реагирует на присутствие остатков газа в трубке,

теряя иногда, вследствие повторной бомбардировки поверхности, всю эмиссию. Так как остатки газа всегда имеются в трубке, такой катод может применяться только до определенной величины анодного напряжения, примерно около 500—1000 вольт (при возможно хорошем вакууме), так как дальнейшее повышение напряжения настолько резко увеличивает (пропорционально квадрату напряжения) катодное распыление (выбивание и удаление с поверхности катода атомов тория, присутствие которых обуславливает большую эмиссию при низкой температуре), что очень быстро весь поверхностный слой тория удаляется, и катод эмиссирует, так же как и вольфрамовый катод, при температуре 2000—2100° K, что равносильно полному отсутствию эмиссии.

Карбидированный вольфрамовый торированный катод представляет собой катод торированный, в котором атомы тория в поверхностном слое связаны с углеродом. Такая связь атомов тория с углеродом делает их более устойчивыми, и они не так легко подвержены распылению. Кроме того, такой катод обладает лучшей отдачей, так как работа выхода электронов из катода понижается.

Оксидные катоды представляют собой металлический катод (вольфрамовый, платиновый, никелевый, молибденовый и пр.), покрытый снаружи оксидами щелочных металлов бария и стронция и имеющий на поверхности пленку (одномолекулярный слой) металлических бария и стронция. Такой катод, так же как и торированный, должен работать при строго определенных условиях и обладает теми же недостатками, как и торированный катод. Но при правильно выбранных условиях эксплуатации дает удельную эмиссию $40—90 \frac{\text{mA}}{\text{W}}$, большую, чем торированные катоды; рабочая температура такого катода около 1500° K.

Способ изготовления оксидного катода заключается в том, что керн из того или иного материала (обычно вольфрама или платины) погружают и высушивают последовательно несколько раз в растворе солей бария и стронция (азотнокислого бария и азотнокислого стронция). В результате на керне осаждается сравнительно тонкий слой, состоящий из оксидов бария и стронция. Для того, чтобы поверхность такого катода сделать активной в смысле испускания электронов, катод подвергается определенной термической обработке и электролизу, цель которых заключается в том, чтобы разложить оксиды и электролизом выделить металлический барий и стронций на поверхность. Так как во время работы катода металлический барий испаряется с поверхности, нужно точно такое же количество атомов бария подводить из слоя оксида на поверхность. Поэтому толщина оксида должна быть строго определенной и зависеть от длины нити, диаметра и той эмиссии, какая снимается в рабочих условиях с катода, так как ток эмиссии производит электролиз и перенос металлического бария на поверхность катода.

Кроме того для устойчивости и прочности слоя имеет значение предварительная подготовка керна, делающая его шероховатым. Такая шероховатость достигается предварительным электролизом керна (А. А. Шапошников и Суходский).

Азидные катоды отличаются материалом керна (входит медь, алюминий) и способом нанесения слоя на поверхность катода. Слой наносится путем испарения в вакууме, либо же путем катодного распыления. Процесс изготовления азидных катодов несколько сложен и, хотя такие катоды обладают лучшей отдачей, все же они еще мало вошли в технику. В американской технике до настоящего времени пользуются оксидными, а не азидными катодами.

Цезированные катоды представляют собой вольфрамовую проволоку, поверхность которой покрыта слоем кислородных атомов и атомов цезия, при этом

трубка содержит пары цезия. Кислород и цезий понижают работу выхода электронов и увеличивают значительно отдачу катода, достигающую величины $800 - 1000 \frac{\text{mA}}{\text{W}}$. Правда все катоды с повышенной отдачей требуют крайне осторожного обращения с ними, не допускают перекала и вообще работают при строго определенных условиях, так как тонкие поверхностные слои крайне чувствительны к температуре и незначительный перекал часто разрушает слой и катод теряет всю свою эмиссию. Цезированные катоды не вошли в технику, так как присутствие паров цезия в трубке затрудняет применение их для практических целей.

Таким образом техника изготовления катода в настоящее время такова, что чем лучшей отдачей обладает катод, тем он сложнее и тем в большей степени он подвержен разрушению при отклонении условий эксплуатации от нормальных.

2. Физические свойства вольфрама как материала и его характеристики.

Все физические величины, характеризующие вольфрамовый катод, в сильной степени зависят от температуры. Основными исходными физическими величинами, необходимыми для полного расчета вольфрамового катода, являются следующие:

ρ — удельное сопротивление	микроом на см	} (249)
η — излучение	ватт/см ²	
i — эмиссия	ампер/см ²	
I_a — световой поток	люмен/ватт	
v — скорость испарения	грамм на см ² в сек.	
Q — функция, учитывающая охлаждение концов нити	см ^{-1/2}	

Значения указанных выше величин ρ , η , i , I_a , v , Q в функции температуры для идеальной вольфрамовой нити даны Форсайтом и Уорсингом (1926)¹ с высокой степенью точности.

Значения, данные Лангмуиром и Джонсом в их более поздней работе (1927 г.),² мало отличаются от данных Форсайта и Уорсинга, поэтому в дальнейшем расчете и будем пользоваться данными последних. В таблице 51 приведены эти значения как функции температуры для чистого вольфрама.

В разное время различными исследователями — Ричардсоном, Лангмуиром, Дэшманом и др. — было предложено большое количество теорий и теоретических формул, выражающих зависимость указанных физических величин от температуры. Укажем на наиболее известную зависимость для электронной эмиссии из нагретого тела от температуры, данную Ричардсоном.

Исходя из кинетической теории газов и рассматривая свободные электроны в проводнике как электронный газ, Ричардсон (1916) дает следующую зависимость электронной эмиссии от температуры нити:

$$I_e = aT^{1/2} e^{-b/T}, \quad (250)$$

где: I_e — эмиссия в А/см², T — температура катода в °K, a и b — постоянные, зависящие от материала катода; постоянная $b = \frac{10^5}{8,62} \text{ } ^\circ\text{K}$.

¹ W. Forsythe, A. Worthing. Revue Gen. de l'Electr., t. XX, № 9, p. 303, 1926.

² Phys. Rev., June, July, August 1927 p. 310, p. 354, p. 408.

где $8,62 \times 10^{-5}$ вольт/°К — универсальная постоянная, ϕ — работа выхода электрона через поверхностный слой ($\phi = 4,53$ для вольфрама).

Для вольфрама $a = 2,36 \times 10^7$, $b = 52\,500$.

Дэшман (1923) предложил формулу:

$$I_s = a' T^b e^{-b'/T}, \quad (251)$$

где коэффициенты: $a' = 60,2$, $b' = 52\,400$, причем в этом случае коэффициент $a' = 60,2$ для всех веществ и не зависит от материала катода ($b' = 52\,400$ для вольфрама).

Таблица 51.

Градусы абсолютные °К	Микроом см r	Ватт см ² w	Люмен ватт I_{η}	Ампер см ² I	Грамм см ³ сек ν	$\frac{1}{Q}$ см
400	8,5	0,006				
600	14,2	0,048				
800	19,7	0,207				
1000	25,1	0,652				0,079
1200	32,0	1,705				0,116
1400	38,5	3,86	0,09	$5,75 \times 10^{-8}$		0,156
1600	45,2	7,87	0,40	$8,05 \times 10^{-7}$		0,196
1800	52,1	14,44	1,20	$3,92 \times 10^{-6}$	$3,4 \times 10^{-10}$	0,238
2000	59,1	24,2	2,70	$8,92 \times 10^{-6}$	88×10^{-10}	0,284
2100	62,9	30,5	3,91	$3,46 \times 10^{-6}$	$0,96 \times 10^{-10}$	0,328
2200	66,3	38,1	5,40	$1,14 \times 10^{-6}$	$8,5 \times 10^{-10}$	
2300	69,9	47,1	7,15	$3,62 \times 10^{-6}$	65×10^{-10}	0,375
2400	73,6	57,6	9,15	$1,02 \times 10^{-6}$	395×10^{-10}	
2500	77,3	69,7	11,4	$2,67 \times 10^{-6}$	$2,15 \times 10^{-9}$	0,422
2600	81,0	83,5	13,9	$6,48 \times 10^{-6}$	$10,2 \times 10^{-9}$	
2700	84,7	99,5	16,6	1,47	43×10^{-9}	0,470
2800	88,5	117,2	20,0	3,21	159×10^{-9}	
2900	92,3	137,5	23,2		$0,54 \times 10^{-8}$	0,519
3000	96,2	160,5	26,6		$1,72 \times 10^{-8}$	0,569
3200	103,8	213,2	34,5		14×10^{-8}	
3400	112,0	278,0 ¹	43,0 ¹		90×10^{-8}	
3655	121,0	378,0 ¹	51,0 ²			

¹ Экстраполировано.

В таблице 52 даны значения постоянных a , b , φ для различных материалов.

Таблица 52.

Материалы	a	b	φ
Вольфрам . . .	$23,6 \times 10^6$	52 500	4,53
Тантал	$11,9 \times 10^6$	50 000	4,40
Молибден . . .	$22,0 \times 10^6$	50 000	4,31
Платина	$11,5 \times 10^6$	51 100	5,40
Уголь	$2,38 \times 10^6$	48 700	4,1
Торий	200×10^6	39 000	2,94
Железо	24×10^6	37 000	3,7 ¹
Никель	$4,84 \times 10^6$	34 000	2,93 ¹
Кальций	$1,76 \times 10^6$	36 500	2,24
Натрий	$1,6 \times 10^{12}$	31 600	1,82
Оксид	$(8 \div 24) \times 10^6$	$19\,400 \div 23\,800$	

Для расчета удобнее пользоваться непосредственно значениями эмиссии в функции температуры. С этой целью в таблице 53 даны значения эмиссии с квадратного сантиметра поверхности в функции температуры для различных материалов катода (Дэшман).

Таблица 53.

Т°К	W	Th	Mo	Ta
	$\frac{I}{\text{см}^2}$	$\frac{I}{\text{см}^2}$	$\frac{I}{\text{см}^2}$	$\frac{I}{\text{см}^2}$
1 000	—	$9,12 \times 10^{-8}$	—	—
1 100	—	$2,51 \times 10^{-8}$	—	—
1 200	—	$3,98 \times 10^{-8}$	—	—
1 300	—	$3,98 \times 10^{-8}$	—	—
1 400	$5,75 \times 10^{-8}$	$3,09 \times 10^{-8}$	$3,63 \times 10^{-8}$	$4,47 \times 10^{-8}$
1 500	$7,94 \times 10^{-8}$	$1,82 \times 10^{-8}$	$4,57 \times 10^{-8}$	$4,68 \times 10^{-8}$
1 600	$8,13 \times 10^{-8}$	$8,51 \times 10^{-8}$	$4,17 \times 10^{-8}$	$3,72 \times 10^{-8}$
1 700	$6,31 \times 10^{-8}$	$3,39 \times 10^{-8}$	$2,95 \times 10^{-8}$	$2,29 \times 10^{-8}$
1 800	$3,98 \times 10^{-8}$	1,15	$1,70 \times 10^{-8}$	$1,20 \times 10^{-8}$
1 900	$2,14 \times 10^{-8}$	3,55	$8,32 \times 10^{-9}$	$5,13 \times 10^{-9}$
2 000	$9,12 \times 10^{-9}$	9,55	$3,31 \times 10^{-9}$	$1,95 \times 10^{-9}$
2 100	$3,55 \times 10^{-9}$	23,44	$1,20 \times 10^{-9}$	$6,43 \times 10^{-9}$
2 200	$1,17 \times 10^{-9}$	53,70	$3,89 \times 10^{-9}$	$1,03 \times 10^{-9}$
2 300	$3,71 \times 10^{-9}$	117,50	$1,15 \times 10^{-9}$	$5,28 \times 10^{-9}$
2 400	$1,05 \times 10^{-9}$	—	$3,09 \times 10^{-9}$	1,34
2 500	$2,74 \times 10^{-9}$	—	$7,76 \times 10^{-9}$	3,14
2 600	$6,68 \times 10^{-9}$	—	—	—
2 700	1,52	—	—	—
2 800	3,30	—	—	—

¹ $2,93 = 34\,000 \, b$, где $b = 8,62 \times 10^{-5}$ вольт/°К универсальная постоянная.

Для излучения мощности в ваттах кв. см поверхности вольфрама Лангмуир дает:

$$\eta = 12,54 \left(\frac{T}{1703} \right)^{4,74} \text{ ватт/см}^2. \quad (252)$$

8. Приближенное математическое выражение характеристик вольфрама.

Теоретические формулы, выражающие зависимость указанных выше физических величин от температуры нити, имеют настолько сложный математический вид, что затрудняют производство с ними дальнейших математических расчетов и выкладок. Поэтому в тех случаях, где необходим чисто математический анализ, мы будем¹ для небольшого интервала температур эти величины представлять в виде показательных функций температуры, например вида:

$$\mu = kT^v,$$

где k и v постоянные, надлежащим образом определенные для данного интервала температуры. Как показали вычисления, отклонения в фактическом ходе кривых в функции температуры незначительны и практически не играют роли для интервалов температуры в 200 — 300°.

Дадим значение показателей v в функциях вида

$$\mu = kT^v$$

для различных физических величин, характеризующих вольфрам в интервале температур от 2500 до 2800°K:

Удельное сопротивление микром/см	$\rho = k_1 T^{v_1}$	$v_1 = 1,17$	} (253)
Излучение ватт/см ²	$\eta = k_2 T^{v_2}$	$v_2 = 4,53$	
Световой поток люмен/ватт	$I_n = k_3 T^{v_3}$	$v_3 = 4,97$	
Эмиссия А/см ²	$I = k_4 T^{v_4}$	$v_4 = 22,0$	
Скорость испарения г/см ² /сек ⁻¹	$\sigma = k_5 T^{v_5}$	$v_5 = 34,6$	
Функция, учитывающая охлажденные концы см ^{-1/2}	$Q = k_6 T^{v_6}$	$v_6 = 1,408$	
Функция	$A = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\eta}{\rho}} = k_7 T^{v_7}$	$v_7 = \frac{v_2 - v_1}{2} = 1,68$	
Функция	$W = 4\pi r \eta^{\frac{1}{2}} = k_8 T^{v_8}$	$v_8 = v_1 + 2v_2 = 10,23$	

Последние две величины A и W входят в две основные формулы расчета катода, которые будут выведены ниже.

Задача расчета заключается в том, чтобы связать указанные выше физические величины с электрическими параметрами (напряжение и ток накала), геометрическими размерами (диаметр, длина), полной эмиссией и сроком службы нити.

Следует указать, что функция Q , учитывающая влияние охлажденных концов нити, является функцией температуры и зависит от способа и характера крепления нити. В работе Форсайта и Уорсинга дано значение функции Q для

¹ См. Ситников М. М. Телефоны и телеграфы без проводов. № 44, 1927, стр. 531.

случай, когда нить плотно зажата на конце и имеет температуру в самом конце T' , равную одной четверти температуры T_m средней части нити: $T' = 0,25 T_m$. В кенотронах нить часто имеет поддержку в виде крючка в средней части, причем в этом участке охлаждение нити имеет другую величину, чем на концах нити. Для первого случая принимаем значение функции Q по Форсайту и Уорсингу, а для второго случая принимаем значение Q_2 , определенное нами.¹

Строго говоря, функция Q_2 изменяется с изменением диаметра, длины и материала крючка, но так как эти изменения в размерах крючка в выпускаемых заводом лампах, обычно, невелики для данного типа ламп, то в виду незначительности изменения будем последним пренебрегать.

4. Метод расчета и основные формулы расчета.

Основные формулы расчета катода получаются элементарным путем из рассмотрения количества энергии, выделяющейся в нити в виде Джоулева тепла:

$$P = VI = I^2 R = I^2 \rho \frac{l}{s} = I^2 \rho \frac{4l}{\pi D^2} \quad (254)$$

и излучающегося с поверхности катода:

$$P = VI = \pi D l \eta, \quad (255)$$

где:

P — мощность	ватт
V — напряжение накала	вольт
I — ток накала	ампер
R — сопротивление нити	ом
D — диаметр нити	см
l — длина нити	см
ρ — удельное сопротивление	ватт на см
η — излучение	микроом/см ²

Из формул (254) и (255) получаем:

$$I = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\eta}{\rho}} D^{3/2} = A D^{3/2}, \quad (256)$$

где $A = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\eta}{\rho}}$;

$$I = 4\pi\eta^2 \frac{l^2}{V^2} = W \frac{l^2}{V^2}, \quad (257)$$

где $W = 4\pi\eta^2$.

Остановимся несколько подробнее на анализе полученных выше двух основных формул.

Первая формула (256) дает связь между тремя величинами: током I , диаметром D и величиной A , которая является только функцией температуры, так как величины η и ρ являются функциями температуры.

Вторая формула (257) дает связь между четырьмя величинами: током I , длиной нити l , напряжением нити V и величиной W , зависящей, как и A , только от температуры нити.

¹ М. М. Ситников. Электричество № 22, 1931, стр. 941.

Таким образом ток накала I и температура нити (A или W) связаны двумя различными уравнениями в одном случае через диаметр, а в другом случае через длину нити и напряжение накала.

Такое разделение геометрических размеров нити между двумя формулами позволит, как увидим дальше, определить диаметр нити по ее длине или наоборот, или то и другое одновременно по вольтамперной характеристике нити. При этом определение диаметра и длины относится уже к готовой нити и сводится к графическому вычислению по экспериментальной вольтамперной характеристике. Под вольтамперной характеристикой понимается зависимость тока накала от приложенного к нити напряжения накала.

Первая формула (256) справедлива не только для идеальной, но и для действительной нити, имеющей охлажденные концы, так как температура в средней части нити зависит только от ее диаметра и тока накала и не зависит ни от длины, ни от напряжения накала, ни от охлаждения концов и способа их крепления.

Вторая формула (257) справедлива только для идеальной нити, т. е. нити, имеющей по всей своей длине одинаковую температуру, или нити, имеющей охлажденные концы и в то же время бесконечно длинной, когда влиянием охлажденных концов можно пренебречь. В случае действительной нити, когда падение напряжения вдоль нити на единицу длины в среднем участке нити больше, нежели у концов, где нить охлаждена и имеет меньшее удельное сопротивление, в формулу (257) должна быть введена поправка, учитывающая дополнительную потерю в напряжении $2\Delta V_c$, на которую увеличилось бы общее падение напряжения на нити, если бы ее температура была везде одинакова и равна температуре в средней части нити.

Поэтому формула (257) принимает вид:

$$I = W \frac{A}{(V + 2\Delta V_c)^{3/2}}, \quad (258)$$

где $2\Delta V_c$ — функция температуры, учитывающая влияние охлажденных концов нити. Коэффициент 2 относится к двум концам нити. Функция $2\Delta V_c$ является функцией только температуры средней части нити и имеет простую зависимость от величины Q , данной в таблице 51.

$$2\Delta V_c = 4,5 \frac{\sqrt{2\pi\eta}}{Q} \approx 0,00063 T - 0,382 \quad (259)$$

5. Учет влияния охлажденных концов катода у вводов.

На рис. 279 дана диаграмма Форсайта и Уорсинга распределения температуры (кривая A) по длине нити у ее конца.

Распределение температуры для нити диаметром $D = 0,02$ см при температуре средней части в 2400°K дано в виде отношения действительной температуры к максимальной температуре (2409°K). На этой же диаграмме даны кривые распределения вдоль по длине нити удельного сопротивления: кривая B , излучения C , светового потока D , эмиссии E и скорости испарения U .¹ Кривые эти являются функцией первой основной кривой A для температуры и могут быть получены пересчетом с достаточной степенью точности по формулам, ука-

¹ Последняя кривая получена нами методом экстраполирования по уравнению (258).

ванным выше, в которых величины ρ , η , l , ... и т. д. представлены в виде показательных функций температуры. Чем больше показатель степени, тем круче идет спадание значения функций вблизи охлажденного конца. Поэтому, если

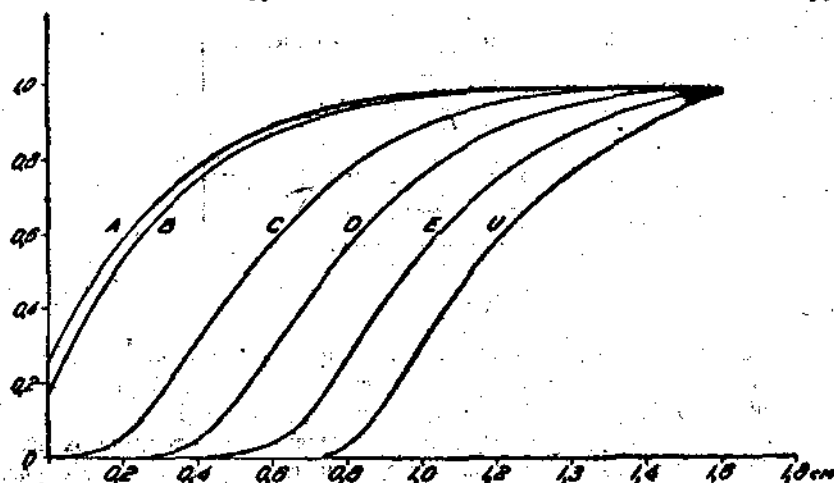


Рис. 279. Кривые распределения температуры (А), сопротивления (В) и т. д., на конце нити катода по Форсайту и Уорсингу

температура охлажденного конца у самого ввода (конца) равна четверти температуры в средней части катода, то эмиссия уже далеко от конца практически равна нулю. Поэтому чем сильнее зависимость физической величины от температуры, тем более сильное влияние на нее оказывают охлажденные концы и тем поправка больше.

Поправку для всех случаев, для всех кривых А, В, С, D, E, Форсайт и Уорсинг крайне удачно ввели в вольты, причем потеря в вольты не зависит от диаметра нити. Это вытекает из следующего рассмотрения охлажденного конца. Рассмотрим кривую В сопротивления нити у охлажденного конца на рис. 280.

Заштрихованная на рис. 280 площадь, состоящая из двух равных площадей B' и B'' , определяет собой потери через охлажденные концы. Ордината b проведена на таком расстоянии, чтобы площадь B' была равна площади B'' ($x = l = 0,27$ см). Таким образом имеем, что полное сопротивление всей нити равно сопротивлению нити, укороченной на 0,27 см с каждого конца и имеющей ту же максимальную температуру по всей длине.

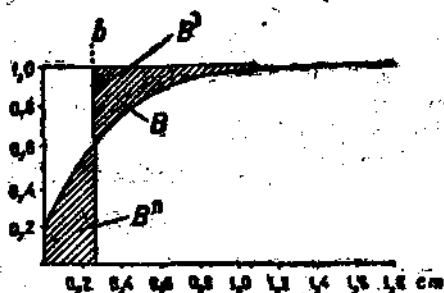


Рис. 280. Учет влияния охлажденного конца нити катода.

$$\Delta L_B = 1,0 \frac{\sqrt{r}}{Q} = 1,0 \frac{\sqrt{0,01}}{0,375} = 0,27 \text{ см}, \quad (260)$$

где $Q = 0,375$ для температуры нити: $T_n = 2400^\circ \text{K}$.

Подобным образом получается ряд формул и для других кривых:

$$\begin{aligned} \Delta L_A &= 0,88 \frac{\sqrt{r}}{Q} && \text{температура} \\ \Delta L_B &= 1,00 \frac{\sqrt{r}}{Q} && \text{сопротивление} \\ \Delta L_C &= 2,25 \frac{\sqrt{r}}{Q} && \text{излучение} \\ \Delta L_D &= 3,00 \frac{\sqrt{r}}{Q} && \text{световой поток} \\ \Delta L_E &= 3,85 \frac{\sqrt{r}}{Q} && \text{эмиссия} \\ \Delta L_U &= 4,45 \frac{\sqrt{r}}{Q} && \text{испарение} \end{aligned} \quad (261)$$

Последний коэффициент 4,45 для случая испарения нити (срок службы или долговечности катода) получен нами путем пересчетов и экстраполирования; остальные коэффициенты, как уже было указано выше, даны Форсайтом и Уорсингом.

Найдем интересующую нас величину, определяющую потери на охлажденном конце. Падение напряжения на охлажденном участке определится из выражения:

$$\Delta V_A = \Delta L_A \frac{dV}{dL} \quad (262)$$

Из основных уравнений найдем, что

$$\frac{dV}{dL} = \sqrt{\frac{2\rho\eta}{r}}, \quad (263)$$

и получим:

$$\Delta V_A = \Delta L_A \frac{dV}{dL} = 0,88 \frac{\sqrt{r}}{Q} \cdot \frac{\sqrt{2\rho\eta}}{\sqrt{r}} = 0,88 \frac{\sqrt{2\rho\eta}}{Q}. \quad (264)$$

Таким образом получаем, что потери на охлажденных концах могут быть выражены в вольтах и не зависят от диаметра нити. При более глубоком рассмотрении вопроса, а главное при большем диапазоне диаметров нити эти ур-ния требуют некоторых поправок в функции Q .¹

Подобным образом получаем поправки для других кривых:

$$\begin{aligned} \Delta V_A &= 0,88 \frac{\sqrt{2\rho\eta}}{Q} && \text{температура} \\ \Delta V_B &= 1,00 \frac{\sqrt{2\rho\eta}}{Q} && \text{сопротивление} \\ \Delta V_C &= 2,25 \frac{\sqrt{2\rho\eta}}{Q} && \text{излучение} \\ \Delta V_D &= 3,00 \frac{\sqrt{2\rho\eta}}{Q} && \text{световой поток} \\ \Delta V_E &= 3,85 \frac{\sqrt{2\rho\eta}}{Q} && \text{эмиссия} \\ \Delta V_U &= 4,45 \frac{\sqrt{2\rho\eta}}{Q} && \text{испарение} \end{aligned} \quad (265)$$

¹ I. Langmuir, Phys. Rev., 1930, I, april.

$$\begin{aligned}\text{Функция: } \Delta V_B &= 1,00 \frac{\sqrt{2\rho\eta}}{Q} = \frac{1}{2} (0,00028 T_m - 0,17) = \\ &= \frac{1}{2} [0,00028 (T_m - 607,5)]\end{aligned}\quad (266)$$

имеет линейную зависимость от температуры. В таблице 54 даны значения функции Q и поправок на охлажденные концы по Форсайту и Уорсингу.

ТАБЛИЦА 54.

Градусы абсолютн. °K	см ^{-1/2} Q	Вольт ΔV_B	Вольт ΔV_C	Вольт ΔV_D	Вольт ΔV_E	Вольт ΔV_U
1000	0,079	0,066	0,150	0,20	0,26	0,2935
1200	0,116	0,089	0,20	0,27	0,34	0,396
1400	0,156	0,112	0,25	0,34	0,43	0,498
1600	0,196	0,1364	0,307	0,41	0,525	0,606
1800	0,238	0,162	0,36	0,49	0,62	0,72
2000	0,284	0,189	0,42	0,57	0,73	0,84
2200	0,328	0,217	0,49	0,65	0,84	0,965
2400	0,375	0,246	0,55	0,74	0,95	1,094
2600	0,422	0,276	0,62	0,83	1,06	1,23
2800	0,470	0,308	0,69	0,92	1,18	1,37
3000	0,519	0,340	0,76	1,02	1,31	1,512
3200	0,569	0,374	0,84	1,12	1,44	1,662

Значение ΔV_U вычислено нами экстраполированием на основании данных Форсайта и Уорсинга.

Таблица 54 дана для охлажденных концов первого рода, т. е. когда температура на конце нити равна четверти температуры средней части.

Для второго случая, когда нить только поддерживается в средней части, в таблице 55 даны значения функций $2\Delta V_c$ и Q_2 , по которой легко сделать пересчет и для всех других поправок на охлажденные концы (см. ур-ния 265).

ТАБЛИЦА 55.

Градусы абсолютн. °K	см ^{-1/2} $Q_1 = Q$	см ^{-1/2} Q_2	Вольт $2\Delta V_c$	Вольт $2\Delta V''_c$
1000	0,079	0,277	0,30	0,0848
1200	0,116	0,438	0,40	0,105
1400	0,156	0,678	0,50	0,116
1600	0,196	0,917	0,614	0,131
1800	0,238	1,190	0,72	0,146
2000	0,284	1,342	0,84	0,161
2200	0,328	1,820	0,98	0,176
2400	0,375	2,162	1,10	0,192
2600	0,422	2,500	1,24	0,210
2800	0,470	2,920	1,38	0,223
3000	0,519	3,310	1,52	0,240
3200	0,569	3,800	1,68	0,252

6. Определение полной эмиссии катода, действительного излучения в средней части нити и пр.

Укажем на ряд формул, определяющих те или другие величины, как например эмиссию, световой поток, излучение, принимая во внимание потери на охлажденных концах. Прежде чем указать эти формулы, дадим в таблице 56 ряд величин в функции температуры, которые получены путем пересчетов из основных величин таблицы 51 и которые нам будут нужны в дальнейшем.

Таблица 56.

Градусы абсолют. °K	$A = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\eta}{\rho}} 10^3$	$W = 4\pi r \eta^2$	Миллиампер ватт г
1000	257		
1200	374		
1400	498	0,0072	$1,49 \times 10^{-4}$
1600	657		$1,022 \times 10^{-4}$
1800	829	0,1364	$2,71 \times 10^{-4}$
2000	1005	0,435	$3,684 \times 10^{-4}$
2100	1095	0,735	$1,134 \times 10^{-4}$
2200	1195	1,208	$2,99 \times 10^{-4}$
2300	1292	1,945	$7,67 \times 10^{-4}$
2400	1393	3,07	1,77
2500	1498	4,72	3,83
2600	1595	7,09	7,76
2700	1704	10,53	14,79
2800	1811	15,28	27,30

Действительное или истинное излучение в ваттах с квадратного сантиметра поверхности в средней части нити определится формулой

$$\eta = \frac{K(V + 2\Delta V_c)}{S} = \frac{K(V + 2\Delta V_c)}{\pi D l} \left[\frac{\text{ватт}}{\text{см}} \right] \quad (267)$$

В этой формуле значение η будет соответствовать какой-то строго определенной температуре, которая может быть определена по данным таблицы 51. Но, в то же время, значение $2\Delta V_c$ должно отвечать той же температуре. Зная ток накала I , напряжение накала V , диаметр D и длину нити l , уравнение (267) определяет однозначно величину излучения η . Определение η можно сделать путем последовательных приближений, задаваясь той или другой температурой. В дальнейшем будет указан метод, разработанный М. Ситниковым, помощью которого производится определение температуры нити в средней части, а следовательно и всех прочих величин функций температуры.

Для определения полной эмиссии со всей нити имеем следующую формулу:

$$I_e = i' l [V - (2\Delta V_E - 2\Delta V_B)], \quad (268)$$

где I_e — полный ток эмиссии в миллиамперах, i' — удельная эмиссия в $\frac{\text{миллиампер}}{\text{ватт}}$ (но не в $\frac{\text{А}}{\text{см}^2}$), V — напряжение накала, $(2\Delta V_E - 2\Delta V_B)$ — функция, учитывающая потерю на охлажденных концах нити.

В этой формуле, как и в предыдущей, величины i' и $(2\Delta V_E - 2\Delta V_B)$ должны относиться к одной и той же температуре средней части нити.

7. Случай расчета нити.

Переходим к собственно расчету нити, причем будем различать три основных случая этого расчета. В одном случае имеем заданные теми или другими условиями определенные геометрические размеры нити (длина, диаметр и способ крепления нити — характер и количество охлажденных концов) и требуется определить все прочие параметры, которые будет иметь такая нить в функции изменения одного из ее параметров. Например будем определять величину эмиссии нити в функции тока накала и т. д.

В другом случае задаемся определенными характеристиками нити и определяем те размеры, какие надо дать нити, чтобы эти характеристики действительно получить.

И наконец третий случай, когда задаемся частично размерами, частично характеристикой и определяем другой размер и остальные параметры нити.

Например, задаемся напряжением накала и длиной нити и определяем, какой нужно взять диаметр нити, чтобы получить определенную эмиссию с нее и т. д.

Очевидно, что вариаций в заданиях расчета — в рамках указанных трех случаев — возможно очень много, если исходить из трех основных уравнений (256), (257) и (268), связывающих шесть независимых переменных D , l , V , I , I_e , T и срок службы H .

8. Диаграмма М. Ситникова для определения диаметра нити.

Кроме общих формул, служащих для расчета катода, укажем на диаграмму,¹ которая дает возможность определения диаметра и длины нити и дает наглядное представление о работе катода. Нанесем на диаграмму рис. 281 кривые зависимости тока накала от температуры по двум основным формулам:

$$\left. \begin{aligned} I &= AD_1^{3/2}, \\ I &= W \frac{l^3}{(V + 2\Delta V_0)^3} \end{aligned} \right\} \quad (269)$$

По первой формуле нанесем ряд кривых для постоянных диаметров $I = AD_1^{3/2}$, $I = AD_2^{3/2}$ и т. д., а по второй формуле нанесем ряд кривых для постоянной длины l при постоянных напряжениях $V_1, V_2, \dots$

¹ М. М. Ситников. Телефония и телеграфия без проводов, 1927, № 44, стр. 531 и Электричест. о, 1931, № 22, стр. 934.

Зная диаметр нити, легко определить ту температуру, которую будет иметь нить при заданном токе накала. Это легко получить непосредственным вычислением по первой (256) формуле. Если диаметр неизвестен, но длина нити известна, температура нити легко определяется помощью указанной диаграммы. Для этого нужно измерить ток при определенном напряжении V_1 и найти точку a' пересечения прямой, параллельной оси абсцисс ($I_1 = \text{const}$), с кривой $I = W \frac{P}{(V_1 + 2\Delta V)^2}$. На рис. 281 сделано подобное определение температуры T_1 . Если на эту же нить дать другое напряжение V_2 , то пересечение кривой $I = \varphi(V_2)$ с тем током накала I_1 , который будет иметь нить, даст новую

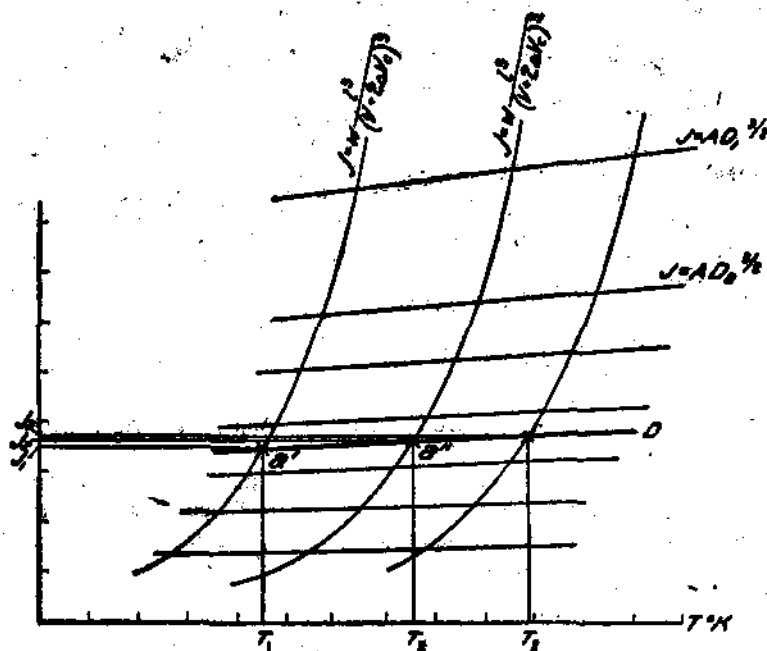


Рис. 281. Диаграмма М. Ситникова для определения диаметра катода.

точку a'' , которой будет соответствовать температура T_2 . Так как диаметр нити остался тем же, то новая точка a'' пересечения будет находиться на той же кривой вида $I = AD^2/4$, что и точка a' . В данном случае диаметр нити определится величиной D .

Очевидно помощью такой диаграммы легко определить вольтамперную характеристику нити, а зная при этом температуру нити, можно определить и все другие ее параметры: эмиссию, световой поток, в функции приложенного к нити напряжения или протекающего по ней тока. Указанную диаграмму (рис. 281) назовем „диаграммой определения диаметра нити“.

Очевидно, что, построив такую диаграмму и определив температуру в средней части нити, легко уже определить и другие параметры нити, как например эмиссию нити, по уравнению (268).

9. Диаграммы, таблицы, кривые для расчета катода и пример расчета катода.

Рассмотрим следующие примеры расчета катода, практически наиболее часто встречающиеся.

Пример 1-ый. Пусть нам заданы следующие величины: I_e , l и V ; катод должен давать полный ток эмиссии I_e , длина нити l задана конструктивно, напряжение накала V задано по напряжению источника питания. Требуется определить диаметр нити, ток накала и температуру нити и проверить, будет ли удовлетворять рассчитанный катод сроку службы? Строим диаграмму определения

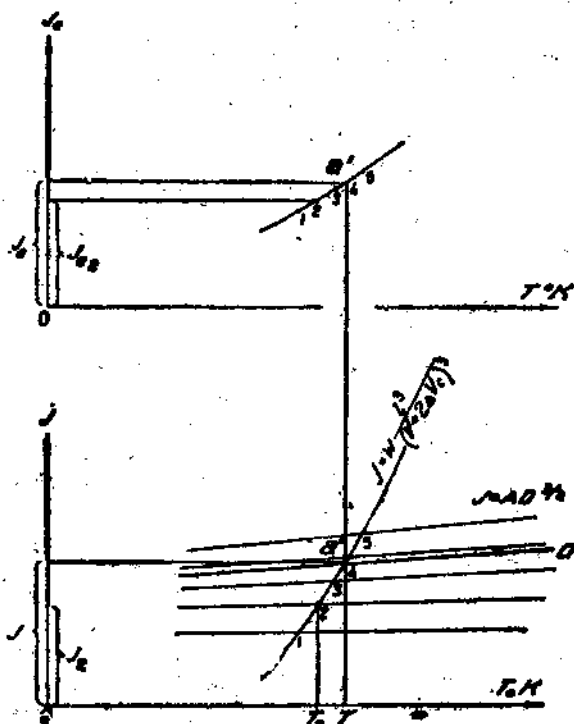


Рис. 282. Диаграмма М. Ситникова для определения диаметра катода по току эмиссии.

диаметра нити (рис. 282) для заданной длины l и заданного напряжения V по двум основным формулам (269).

В случае, если нить V-образная, очевидно нужно учесть еще два охлажденных участка около поддерживающего нить крючка:

$$= W \frac{l^3}{(V + 2\Delta V_c + 2\Delta V_c'')^3} \quad (270)$$

Далее для точек 1, 2, 3, пересечения кривой $I = W \frac{l^3}{(V + 2\Delta V_c)^3}$ с кривыми равных диаметров определяем полную эмиссию по формуле:

$$I_e = i I (V - (2\Delta V_E - 2\Delta V_B)), \quad (271)$$

где I_1 относится к температуре в средней части катода. Так, для точки 2 определяем:

$$I_{e2} = i_2 I_2 [V - (2\Delta V_{E2} - 2\Delta V_{B2})], \quad (272)$$

где i_2 и поправка на охлажденные концы берется для температуры T_2 .

На диаграмму наносим кривую полной эмиссии I_e . Определяем точку пересечения a' найденной кривой эмиссии с прямой параллельной оси абсцисс и представляющей собой заданную I_e эмиссию. Проводя линию $a'a''$, перпендикулярно оси абсцисс, находим точку a'' , отвечающую определенному диаметру D и температуре T .

Остается проверить, не превосходит ли полученная температура для нити данного диаметра D допустимую температуру с точки зрения срока службы? Если окажется, что температура недопустима, то это значит, что нужно либо изменить длину нити, либо изменить напряжение накала, так как для заданных длины и напряжения нити требуемая эмиссия слишком велика и не может быть получена при хорошем сроке службы. Поэтому для предварительного расчета катода можно определить его приблизительные размеры, чтобы катод не был перегружен или наоборот слишком слабо использован. Для этой цели приводим таблицу 57, в которой для наиболее часто встречающихся диаметров вольфрамовой нити даны значения токов накала I , температуры, отдачи катода и эмиссии на 1 см длины нити при трех различных сроках службы 400, 800 и 2000 часов.

Пример 2-й. Рассмотрим схему расчета катода, когда заданы: полная эмиссия катода $I_e = 1200$ миллиампер, длина V-образной нити $l = 92 \times 2 = 184$ мм и срок службы $H = 800$ часов. Определим, какой следует взять диаметр и определим, чему будет равен ток и напряжение накала при эмиссии, равной $I_e = 1000$ миллиампер. Очевидно, что данная задача всегда разрешима, так как заданы только три условия и четвертое условие — напряжение накала может быть произвольным.

Определим эмиссию на единицу длины $\frac{I_e}{l} = \frac{1000}{18,4} = 54,3 \text{ А} = 0,0543 \text{ А}$; по

таблице 57 находим для срока службы $H = 800$ часов, ближайший большой диаметр 0,35 мм (0,0759). Диаметр нити, который обеспечивает требуемую эмиссию, практически всегда приходится брать по диаметру имеющейся проволоки. Далее, зная диаметр и длину, можно уже вполне точно определить остальные параметры катода, причем в виду того, что диаметр нами взят по диаметру имеющейся проволоки, ближайшей к расчетному, дальнейший расчет может идти двумя путями; напряжение и ток накала (с учетом влияния охлажденных концов) определяются такими, при которых 1) либо срок службы будет равен заданному, т. е. 800 часам, 2) либо полная эмиссия будет равна заданной.

Практически конечно дальнейший расчет следует вести по заданному току эмиссии.

Имеем основные уравнения:

$$I = AD^{3/2},$$

$$I = W \frac{1}{(V + 2\Delta V_c + 2\Delta V_e)^{3/2}},$$

$$\begin{aligned} I_e &= i I [V - (2\Delta V_E - 2\Delta V_B + 2\Delta V_E'' - 2\Delta V_B'')] = \\ &= i I [V - 1,268 (2\Delta V_c + 2\Delta V_e'')], \end{aligned}$$

(273)

где $1,268 = \frac{3,85 - 1}{2,25}$ [см. формулы (265)].

D мм	H = 40 часов				H = 80 часов				H = 200 часов			
	Т° К	Ток нагрузки I	$\frac{mA}{W}$ P	$\frac{A}{cm}$ $\frac{I_e}{I_e}$ cm	Т° К	Ток нагрузки I	$\frac{mA}{W}$ P	$\frac{A}{cm}$ $\frac{I_e}{I_e}$ cm	Т° К	Ток нагрузки I	$\frac{mA}{W}$ P	$\frac{A}{cm}$ $\frac{I_e}{I_e}$ cm
0,008	2417	0,032	2,10	0,000314	2375	0,0308	1,45	0,00021	2325	0,0296	0,95	0,000123
0,014	2453	0,075	2,70	0,000770	2411	0,0728	1,95	0,00049	2356	0,0699	1,23	0,000299
0,015	2457	0,084	2,80	0,000855	2415	0,0815	2,00	0,00059	2359	0,0782	1,28	0,000330
0,016	2461	0,093	2,90	0,000955	2419	0,0902	2,10	0,00065	2363	0,0865	1,31	0,000372
0,017	2464	0,102	2,95	0,00104	2423	0,0989	2,15	0,00080	2365	0,0948	1,34	0,000406
0,020	2472	0,131	3,23	0,00132	2433	0,127	2,30	0,00094	2375	0,125	1,45	0,000516
0,030	2495	0,242	3,65	0,00236	2467	0,237	3,00	0,00184	2400	0,234	1,75	0,000990
0,060	2525	0,708	4,85	0,00675	2495	0,691	3,70	0,00481	2445	0,567	2,54	0,00311
0,080	2555	1,106	5,80	0,0108	2512	1,057	4,12	0,00740	2461	1,037	2,90	0,00478
0,100	2569	1,570	6,20	0,0154	2516	1,502	4,28	0,00959	2466	1,455	3,00	0,00628
0,15	2595	2,93	7,50	0,0292	2549	2,84	5,40	0,0193	2495	2,64	3,70	0,0120
0,20	2619	4,70	8,90	0,0484	2569	4,53	6,20	0,0308	2511	4,35	4,12	0,0185
0,25	2632	6,46	9,70	0,0683	2585	6,26	6,97	0,0444	2527	6,02	4,60	0,0264
0,30	2644	8,56	10,45	0,0909	2595	8,27	7,50	0,0585	2536	7,96	4,90	0,0344
0,35	2655	10,83	11,20	0,116	2607	10,50	8,15	0,0759	2545	10,12	5,22	0,0431
0,40	2665	13,28	11,95	0,144	2619	12,92	8,90	0,0968	2553	12,40	5,60	0,0540
0,50	2681	18,79	13,20	0,203	2632	18,22	9,70	0,138	2569	17,49	6,20	0,0771
1,00	2732	55,20	17,90	0,578	2681	53,18	13,20	0,405	2619	51,05	8,72	0,237
2,00	2784	161,80	25,30	1,585	2732	155,20	17,90	1,156	2665	148,80	11,95	0,720

Величины A , W , I , $2\Delta V_c$, $2\Delta V_c''$ являются функциями температуры и поэтому могут быть рассматриваемы, как одно неизвестное — температура T . Таким образом имеем три уравнения с тремя неизвестными T , I и V , т. е. задача математически вполне разрешима, если представить в аналитической форме указанные выше функции температуры. Точное математическое решение указанных уравнений крайне сложно, поэтому укажем более простой способ, достаточно точный, решения этих уравнений.

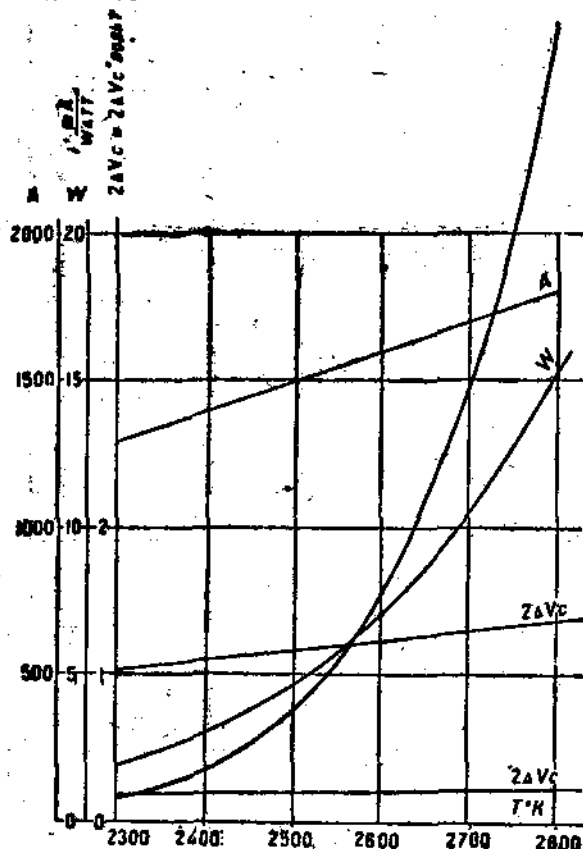


Рис. 283. Характеристики вольфрама, как катодного материала, по Форсайту и Уорсингу.

I , $2\Delta V_c$ и $2\Delta V_c''$ — функции температуры — берутся из таблиц, либо из диаграммы рис. 283.

Дадим один численный расчет катода по вышеуказанной схеме. Нам представляется, что идея метода расчета достаточно ясна и те изменения в ходе расчета в каждом конкретном случае могут быть легко сделаны, если исходить из основных формул (256), (257), показательных функций температуры (253), таблицы 57 и общей таблицы 51, дающей значения всех величин в функциях температуры.

Переходим к численному примеру:

Задаемся тремя значениями температур:

$$T = 2580; T_1 = 2600; T_2 = 2620^\circ \text{K}.$$

Зададимся последовательно несколькими температурами T (при удачном выборе достаточно задаться двумя температурами) и определим, какие при этом получатся ток накала, напряжение накала и полная эмиссия катода. Зададимся тремя температурами T_1 , T_2 и T_3 .

По первому уравнению (273) определим I_1 , I_2 и I_3 . По второму уравнению, подставив последовательно I_1 , I_2 и I_3 , определим V_1 , V_2 и V_3 . По уравнению третьему найдем, подставив в него значения I_1 и V_1 , I_2 и V_2 , I_3 и V_3 , три значения тока эмиссии I_{e1} , I_{e2} , I_{e3} . Далее по трем точкам строим кривую тока эмиссии в функции напряжения накала и находим путем интерполирования, при удачном выборе температур, напряжение накала, при котором эмиссия равна заданной. Правильный выбор температур T_1 , T_2 и T_3 может быть легко сделан, если руководствоваться таблицей 57.

Значения величины A , W ,

По ур-нию (273) определим: $I_1 = 10,35$; $I_2 = 10,49$ и $I_3 = 10,60$ ампер.
По ур-нию (273) определим: V_1 , V_2 и V_3 .

Для этого по диаграмме рис. 283 найдем:

$$W_1 = 6,5; W_2 = 7,1; W_3 = 7,7;$$

$$(2\Delta V_c + 2\Delta V_c'') = 1,215 + 0,205 = 1,420 = x_1$$

$$(2\Delta V_c + 2\Delta V_c'') = 1,24 + 0,210 = 1,450 = x_2$$

$$(2\Delta V_c + 2\Delta V_c'') = 1,25 + 0,215 = 1,465 = x_3$$

Ур-ние (273), решенное относительно V , будет иметь следующий вид:

$$V = I \sqrt[3]{\frac{W}{I}} - x_i; \quad (273a)$$

подставляя в него численные значения, получим:

$$V_1 = I \sqrt[3]{\frac{W_1}{I_1}} - x_1 = 18,4 \sqrt[3]{\frac{6,5}{10,35}} - 1,420 = 15,78 - 1,420 = 14,36;$$

$$V_2 = I \sqrt[3]{\frac{W_2}{I_2}} - x_2 = 18,4 \sqrt[3]{\frac{7,1}{10,49}} - 1,450 = 16,12 - 1,45 = 14,67;$$

$$V_3 = I \sqrt[3]{\frac{W_3}{I_3}} - x_3 = 18,4 \sqrt[3]{\frac{7,7}{10,60}} - 1,465 = 16,540 - 1,465 = 15,075.$$

Определим эмиссию; для этого на рис. 283 найдем:

$$i_1' = 6,7 \quad x_1' = 1,268 \quad x_1 = 1,80 \quad V_1 - x_1' = 12,56 \text{ вольт}$$

$$i_2' = 7,7 \quad x_2' = 1,268 \quad x_2 = 1,84 \quad V_2 - x_2' = 12,83$$

$$i_3' = 8,85 \quad x_3' = 1,268 \quad x_3 = 1,86 \quad V_3 - x_3' = 13,21$$

откуда:

$$I_{e1} = i_1' I_1 (V_1 - x_1') = 6,7 \times 10,35 \times 12,56 = 870 \text{ миллиампер}$$

$$I_{e2} = i_2' I_2 (V_2 - x_2') = 7,7 \times 10,49 \times 12,83 = 1035$$

$$I_{e3} = i_3' I_3 (V_3 - x_3') = 8,85 \times 10,60 \times 13,215 = 1241$$

Построив кривую и интерполируя, найдем, что эмиссия 1000 мА будет получена при токе накала $I = 10,47$ А и напряжении $V = 14,59$ В.

Для удобства пользования данными таблицы 57 на диаграммах рис. 284—291, эти данные представлены в виде кривых.

На рис. 284 и 285 даны значения тока накала в функции диаметра при постоянном сроке службы. Из кривых видно, что небольшое увеличение тока значительно уменьшает срок службы. На рис. 286 и 287 даны значения допустимых температур для нитей диаметром от 0,01 мм до 2,0 мм при трех сроках службы — 400 часов, 800 часов и 2000 часов. На рис. 288 и 289 даны значения допустимой отдачи катода $i' \frac{\text{мА}}{\text{В}}$ для различных диаметров и сроков службы.

Из указанных кривых например следует, что с нити диаметром 0,02 мм допускаемая отдача при сроке службы $H = 800$ часов составляет $2,3 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$, тогда как с нити в 1 мм можно при том же сроке службы снять $13,1 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$.

Кривые рис. 290 и 291 служат для предварительного выбора диаметра нити по заданной эмиссии и сроку службы и представляют кривые тока эмиссии в амперах на 1 см длины нити для разных диаметров ее при трех сроках службы.

На рис. 283 представлены функции A , W , I , $2\Delta V_0$, $2\Delta V_0''$ для интервала температур от 2300 до 2800° K.

В таблице 57 даны значения всех величин, вычисленных для различных

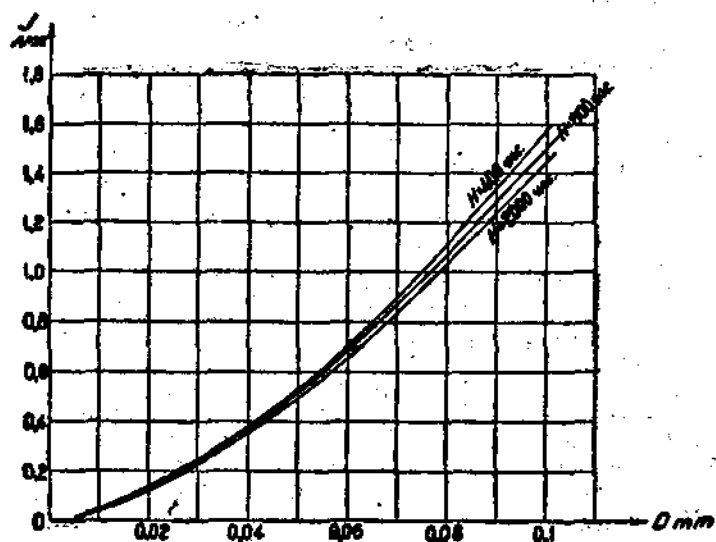


Рис. 284. Ток накала катода в функции диаметра нити (от 0,01 до 0,1 мм) при постоянном сроке службы.

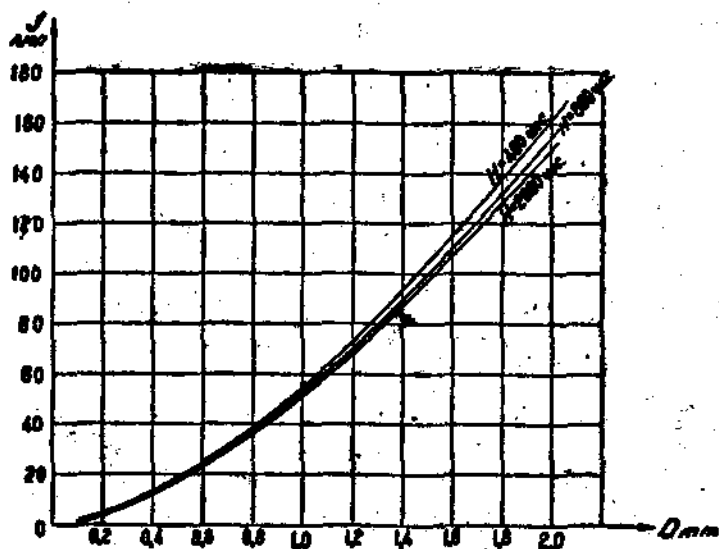


Рис. 285. Ток накала катода в функции диаметра нити (от 0,1 до 2,0 мм) при постоянном сроке службы.

сроков службы, причем под сроком службы понималось время, в течение которого диаметр нити уменьшится на 10%, и температура нити во все время срока службы поддерживается постоянной, равной начальной.

Расчет катода для кенотронных выпрямителей имеет существенное значение, так как только правильно рассчитанный катод дает удовлетворительный срок

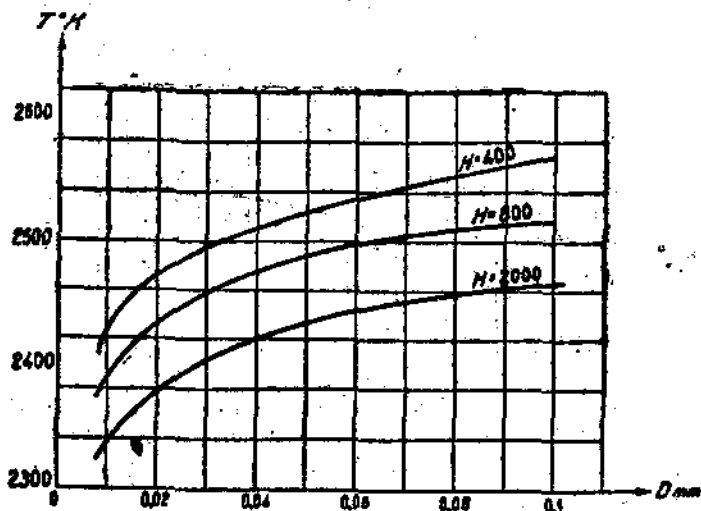


Рис. 286. Температура катода в функции диаметра нити (от 0,01 до 0,1 мм) для различных сроков службы.

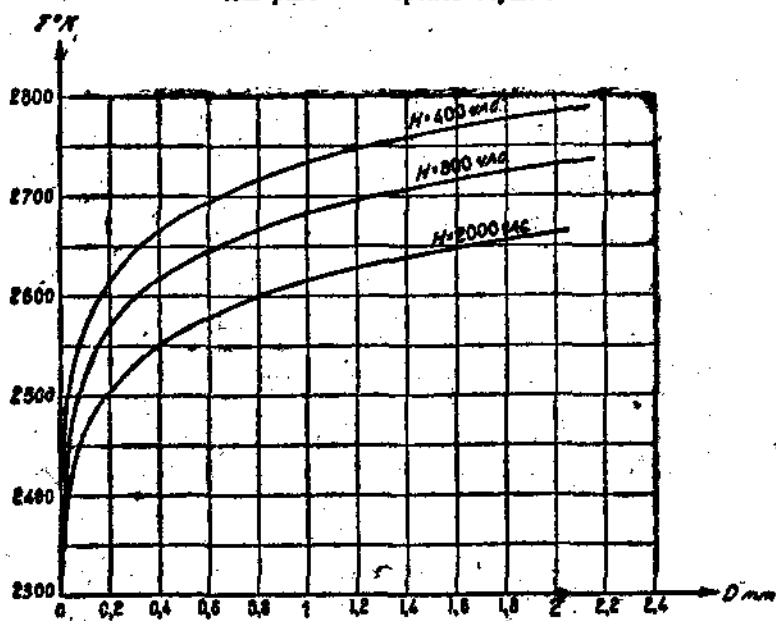


Рис. 287. Температура катода в функции диаметра нити (от 0,1 до 2,0 мм) для различных сроков службы.

службы выпрямителя. Поэтому рассмотрим подробнее вопрос о сроке службы катода, указав на то обстоятельство, что долговечность катода в сильной мере зависит от тех условий, в которые будет поставлен катод при эксплуатации.

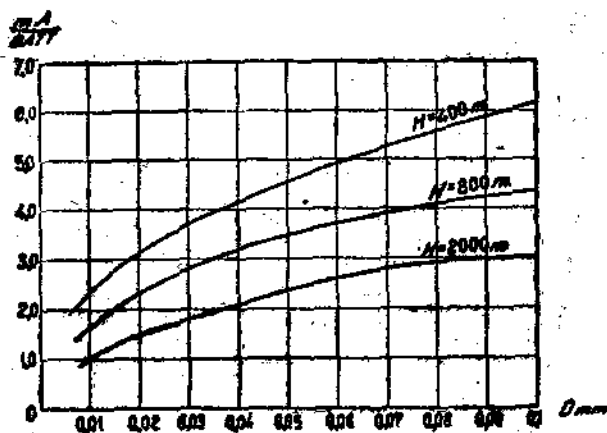


Рис. 288. Отдача катода в миллиамперах на ватт в функции диаметра нити (от 0,01 до 0,1 мм) для различных сроков службы.

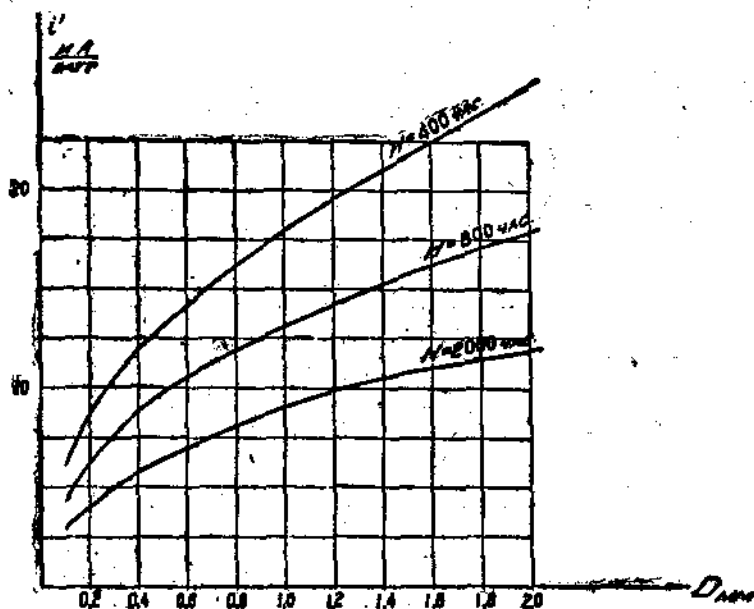


Рис. 289. Отдача катода в миллиамперах на ватт в функции диаметра нити (от 0,1 до 2,0 мм) для различных сроков службы.

10. Расчетные формулы и расчет вольтамперной характеристики для идеальной нити и нити действительной.

Представляя характеристики вольфрама в виде показательных функций температуры, не трудно получить из основных расчетных формул следующие формулы и зависимости, служащие для различных пересчетов катода:

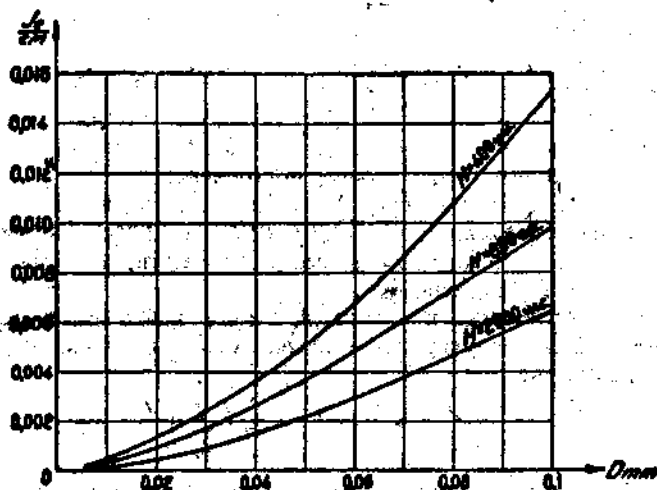


Рис. 290. Расчетные кривые эмиссии на 1 см длины нити катода (при диаметрах ее от 0,01 до 0,1 мм) при различных сроках службы.

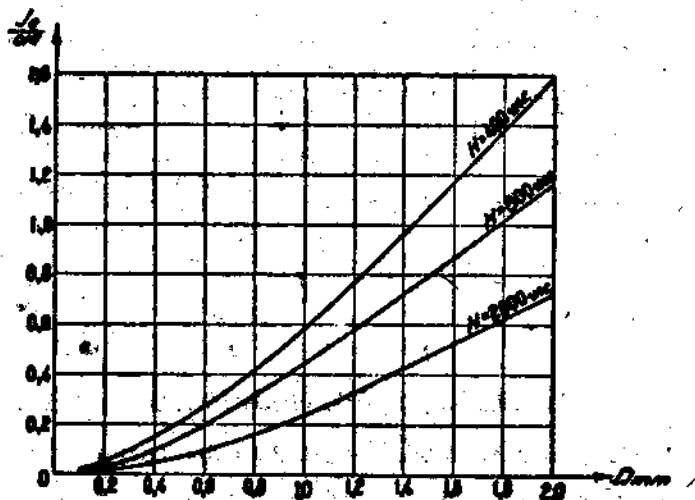


Рис. 291. Расчетные кривые эмиссии на 1 см длины нити катода (при диаметрах ее от 0,1 до 2,0 мм) при различных сроках службы.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{V_e}{V} &= \left(\frac{I}{I_0} \right)^{1/4} = \left(\frac{I_e}{I_0} \right)^{1/4} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^{1/2} \quad \text{при } T = \text{const и } l = \text{const}, \\
 \frac{I_e}{I_0} &= \left(\frac{V}{V_0} \right)^{6,13} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{21,0} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^{43,7} \quad \text{при } I = \text{const и } l = \text{const}, \\
 \frac{I_e}{I_0} &= \left(\frac{I}{I_0} \right)^{3,71} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{27,2} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^{4,80} \quad \text{при } V = \text{const и } l = \text{const}, \\
 \frac{I}{I_0} &= \left(\frac{V_e}{V_0} \right)^{2,36} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{31,2} = \left(\frac{D_0}{D} \right)^{1,42} \quad \text{при } I_e = \text{const и } l = \text{const},
 \end{aligned} \right\} (274)$$

$$8,18 = \left(\frac{3v_1}{v_2 - v_1} - 1 \right) : \left(\frac{2v_1 + v_1}{v_2 - v_1} \right) = \frac{3v_1 - v_2 + v_1}{2v_2 + v_1} \text{ и т. д.} \quad (275)$$

В эти соотношения не входит величина длины l катода, так как при их выводе предполагалось, что она есть величина постоянная.

Между любыми четырьмя переменными величинами из шести: — T, I, V, I_0, D и l можно на основании ур-ний (256), (257) и (258) методом, указанным в настоящей работе, вывести аналогичные зависимости, полагая две остальные переменные величины постоянными.

Так, полагая $D = \text{const}$ и $l = \text{const}$, можно найти связь между током и напряжением накала. Не учитывая влияния охлажденных концов, получаем следующую зависимость:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{I}{I_0} \right)^{\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}} = \left(\frac{I}{I_0} \right)^{1,7} \quad (276)$$

Влияние охлажденных концов несколько увеличивает показатель 1,7. Расчет, сделанный для вольтамперной характеристики в пределах изменения температуры от $T_0 = 2000^\circ \text{K}$ до $T = 2500^\circ \text{K}$ и для $V_0 = 4,0$ вольт, дает вместо значения 1,7 значение 1,82.

Вольтамперная характеристика с учетом влияния охлажденных концов будет иметь вид:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{v_2 + v_1}{2}} \left\{ 1 + \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{v_2 + v_1}{2}} \cdot \frac{1}{V_0} \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{v_2 + v_1}{2}} \cdot 2\Delta V_{co} - 2\Delta V_c \right] \right\}; \quad (277)$$

подставляя численные значения для $V_0 = 4,0$ вольт, $T_0 = 2000^\circ \text{K}$, получим:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{I}{I_0} \right)^{1,82} \quad (278)$$

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

СРОК СЛУЖБЫ ВОЛЬФРАМОВОГО КАТОДА.

1. Общая постановка вопроса о сроке службы катода.

Под сроком службы катода понимается время, в течение которого или диаметр катода уменьшится на определенную величину, или его температура изменится (понижится или повысится) до определенной величины, или уменьшится эмиссия на определенную величину и т. д. Все эти изменения являются следствием испарения вольфрама с поверхности катода.

Величина допустимого изменения задается теми практическими требованиями, которые предъявляются к катоду. Для примера возьмем такое условие: при постоянном напряжении накала, срок службы определяется временем, в течение которого эмиссия катода уменьшится на 40%. По рис. 298 (см. ниже) этому изменению эмиссии соответствует уменьшение диаметра на 10%; при этом срок службы для катода, имеющего начальный диаметр $D_0 = 0,0058$ см, начальный ток накала $I_0 = 662$ мА и следовательно начальную температуру $T_0 = 2500^\circ \text{K}$, — определяется в $H = 985$ часов $\left(H/D_0 = 1,7 \cdot 10^5 \frac{\text{час}}{\text{см}} \right.$ по рис. 298 и 297).

Этот пример соответствует идеальному случаю, когда нет влияния охлаждающих концов катода, следовательно случаю бесконечно длинного катода; для действительного же случая срок службы изменится, в зависимости от длины катода и его начальных данных, на большую или меньшую величину.

Выведем общую формулу изменения диаметра катода в функции времени под влиянием испарения вольфрама.

Вывод относится к цилиндрической форме вольфрамового катода, но аналогично указанному в дальнейшем методу, он может быть соответственно применен в некоторых частных случаях и для другой формы катода, а также и другого материала.

Если за некоторое время произойдет уменьшение диаметра катода, то уменьшению веса катода будет соответствовать испарение такого же количества вольфрама с боковой цилиндрической поверхности, происшедшее за то же время.

Введем следующие обозначения: D_0 — начальный диаметр катода, D — диаметр через промежуток времени $t - t_0 = H$, l — длина катода, γ — удельный вес вольфрама ($\gamma = 19,1$), v — скорость испарения вольфрама в $\frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$ для данной температуры катода.

Уравнение, выражающее изменение диаметра катода с течением времени, будет:

$$-\frac{\gamma}{2} dD = v dt. \quad (279)$$

Интегрируя ур-ние (279), имеем:

$$-\frac{\gamma}{2} \int_{D_0}^D \frac{dD}{v} = \int_{t_0}^t dt = t - t_0 = H, \quad (280)$$

где D_0 — начальный диаметр, D — конечный диаметр и H — срок службы катода. При определении срока службы задаемся величиной $\frac{D}{D_0}$ по тем или иным соотношениям и находим интеграл (280) в данных пределах.

2. Зависимость срока службы катода от условий эксплуатации.

Важно отметить, что величина скорости испарения вольфрама обычно не остается величиной постоянной, а изменяется с течением времени. Для получения интеграла (280) скорость испарения v должна быть выражена в функции диаметра,¹ если интеграл берется в пределах изменения диаметра от начального диаметра D_0 до некоторого конечного диаметра D , или в функции температуры, если интеграл берется в пределах изменения температуры от начальной температуры T_0 до конечной T . Таким образом имеем:

$$v = f(T) = \varphi(D). \quad (281)$$

Вид функции (281) зависит от тех условий, в какие поставлен катод при определении его срока службы.

В дальнейшем обозначаем: I — ток накала, V — напряжение накала и I_0 — ток эмиссии.

¹ Ур-ние В. И. Волюнкина; см. курс А. И. Берга. Общая теория радиотехники. Ленинград, 1925, стр. 194 — 195.

² М. М. Ситников. Телеф. и телегр. без проводов. № 44, 1927 г., стр. 531, Срок службы вольфрамового катода.

Рассмотрим срок службы катода в четырех следующих условиях:

- 1) температура средней части катода поддерживается постоянной за все время службы катода ($T = \text{const}$); при этом ток накала уменьшается;
- 2) ток накала поддерживается постоянным ($I = \text{const}$); при этом температура катода после известного времени очень быстро возрастает;
- 3) напряжение накала поддерживается постоянным ($V = \text{const}$); при этом в идеальном случае (для бесконечно длинного катода или для катода, не имеющего охлажденных концов) температура катода понижается, а в действительных условиях может повышаться, понижаться или оставаться постоянной в зависимости от влияния, которое оказывают охлажденные концы;
- 4) эмиссия катода поддерживается постоянной ($I_e = \text{const}$); при этом температура катода увеличивается.

Для дальнейших вычислений введем следующие обозначения отношения диаметров катода:

$$k = \frac{D}{D_0} \leq 1 \quad \text{и} \quad k_0 = \frac{D_0}{D} \geq 1. \quad (282)$$

3. Срок службы и изменение характеристики катода для различных условий эксплуатации.

а. Срок службы катода при условии постоянства температуры, $T = \text{const}$.

Обычный расчет срока службы катода производится в предположении постоянства температуры или скорости испарения вольфрама:

$$v = v_0 = \text{const.}$$

Интегрируя ур-ние (280), получаем:

$$\left. \begin{aligned} H &= -\frac{\gamma}{2} \int_{D_0}^D \frac{dD}{v_0} = \frac{\gamma}{2v_0} (D_0 - D) = \frac{\gamma D_0}{2v_0} (1 - k) \\ \text{или} \quad \frac{H}{D_0} &= \frac{\gamma}{2v_0} (1 - k) \left[\frac{\text{сек}}{\text{см}} \right] = \frac{\gamma}{2v_0 \cdot 3600} (1 - k) \left[\frac{\text{час}}{\text{см}} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (283)$$

Скорость испарения v_0 определяется начальной температурой: по начальному току накала и начальному диаметру катода определяют по ур-нию (256) величину A , а по последней, на основании ур-ния (253), находят температуру, а следовательно, и скорость испарения v_0 . Задаваясь по тем или иным соображениям величиной коэффициента k , определяют по ур-нию (283) срок службы катода H для данного начального диаметра D_0 катода.

Проследим, как меняются ток накала катода, напряжение накала и эмиссия катода с изменением диаметра такового.

Зависимость тока накала от изменения диаметра при $T = \text{const}$.

Исходя из ур-ния (256) для начального тока и диаметра и для тока при некотором уменьшенном диаметре, имеем:

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= A_0 D_0^{3/2}, \\ I &= A D^{3/2}; \end{aligned} \right\} \quad (284)$$

по условию постоянства температуры $A_0 = A$, откуда, деля второе равенство на первое, получаем:

$$I = I_0 k^{3/2}, \quad (285)$$

т. е. ток накала уменьшается прямо пропорционально степени $3/2$ уменьшения диаметра.

Зависимость напряжения накала от изменения диаметра при $T = \text{const}$.

Для этого случая уравнение (256) будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= A_0 D_0^{3/2} = W_0 \frac{l^3}{V_0^3}, \\ I &= A D^{3/2} = W \frac{l^3}{V^3}; \end{aligned} \right\} \quad (286)$$

по условию $T = \text{const}$ имеем $A_0 = A$ и $W_0 = W$, откуда получаем:

$$V = V_0 k^{1/2}, \quad (287)$$

т. е. напряжение накала увеличивается обратно пропорционально квадрату уменьшения диаметра.

Зависимость эмиссии катода от изменения диаметра при $T = \text{const}$.

Для эмиссии со всей поверхности катода получаем выражения:

$$\left. \begin{aligned} I_{e0} &= \pi D_0 I_{i0} \\ I_e &= \pi D I_i \end{aligned} \right\} \quad (288)$$

по условию равенства температуры эмиссия с см² поверхности постоянна, или $I_e = i$; деля второе равенство на первое и вводя k , получаем:

$$I_e = I_{e0} k, \quad (289)$$

т. е. эмиссия уменьшается прямо пропорционально уменьшению диаметра.

Последние две зависимости (288) и (289) отвечают идеальному случаю, т. е. они не учитывают влияния охлажденных концов катода.

На рис. 292 и 293 представлены кривые, относящиеся к данному случаю.

б. Срок службы катода при условии постоянства тока накала. Практически этот случай имеет место в установках, где последовательно с катодом включается баррер для поддержания постоянным тока накала катода.

Найдем зависимость скорости испарения v от изменения диаметра катода при постоянном токе накала.

Исходя из уравнений (253), (256) и (257), пишем:

$$I = A D^{3/2} = k_7 T^{\frac{v_2 - v_1}{2}} D^{3/2}, \quad (290)$$

откуда

$$T = \left(\frac{I}{k_7} \right)^{\frac{2}{3 - v_1}} \frac{1}{D^{\frac{3 \times 2}{2(v_2 - v_1)}}} \quad (291)$$

Для скорости испарения получаем зависимость:

$$v = k_8 T^{v_2} = k_8 \left(\frac{I}{k_7} \right)^{\frac{2v_2}{3 - v_1}} \frac{1}{D^{\frac{3v_2}{2(v_2 - v_1)}}} = \alpha D^{-\beta}, \quad (292)$$

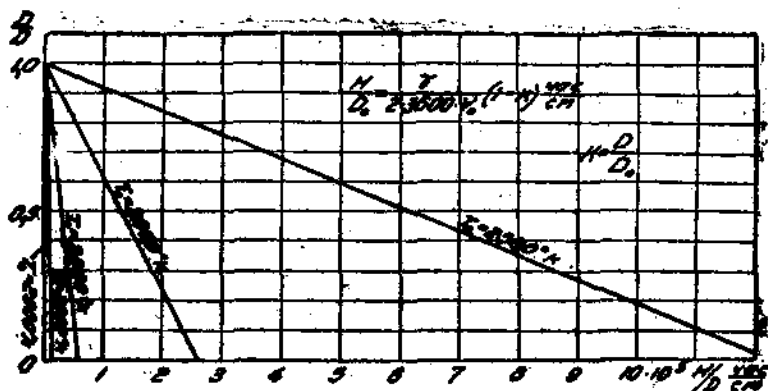


Рис. 292. Сроки службы катода при различных $T = \text{const}$.

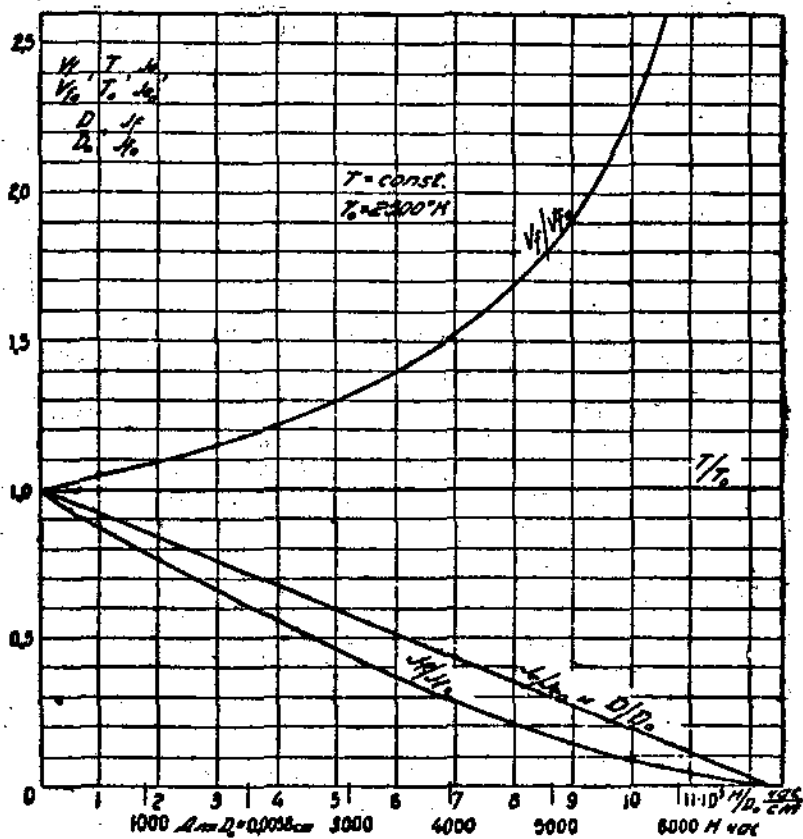


Рис. 293. Изменение характеристик катода с течением времени при $T = \text{const}$.

где α — постоянный коэффициент ($I = \text{const}$), а

$$\beta = \frac{3v_2}{v_2 - v_1} = 30,9. \quad (293)$$

Подставляя выражение (292) скорости испарения в функции диаметра в ур-ние (280) и производя интегрирование, получаем:

$$H = -\frac{1}{2} \int_{D_0}^{D} \frac{D^\beta \cdot dD}{\alpha} = \frac{\gamma D_0^{\beta+1}}{2\alpha(\beta+1)} (1 - k^{\beta+1}); \quad (294)$$

подставляя в ур-ние (294) v_0 , полученное из ур-ния (292), имеем:

$$H = \frac{\gamma D_0}{2v_0} \frac{1 - k^{\beta+1}}{\beta+1}, \quad (295)$$

$$\frac{H}{D_0} = \frac{\gamma}{2v_0} \frac{1 - k^{31,9}}{31,9} \left[\frac{\text{час}}{\text{см}} \right]. \quad (296)$$

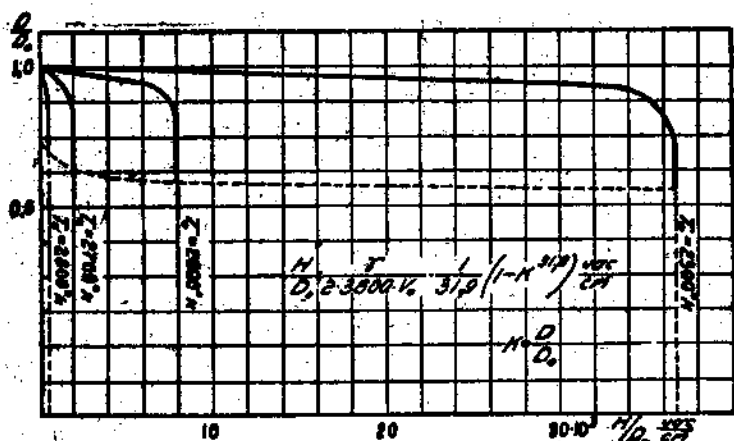


Рис. 294. Сроки службы катода при различных $I = \text{const}$.

Аналогично предыдущему случаю выводится зависимость изменения температуры, напряжения и эмиссии катода с изменением диаметра при соблюдении условия постоянства тока накала во все время службы катода.

Получаем следующие зависимости:

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 k_0^{\frac{3}{2v_2 + v_1}} = T_0 k_0^{0,89}, \\ V &= V_0 k_0^{\frac{3v_2 - v_1}{3v_2}} = V_0 k_0^{3,06}, \\ I_a &= I_{a0} k_0^{\frac{3v_2 - v_1}{3v_2}} = I_{a0} k_0^{18,7} \end{aligned} \right\} \quad (297)$$

Последние две зависимости, так же как и в первом случае, отвечают идеальному условию. На рис. 294 и 295 представлены кривые изменения диаметра в функции времени при постоянном токе накала; после некоторого значения диаметра они нанесены пунктиром. Точка перехода из сплошной кривой в

пунктирную соответствует моменту плавления катода, и дальнейший ход кривой представляет чисто теоретическую зависимость.

Изменение диаметра и температуры в функции времени под конец срока службы носит настолько резкий характер, что интересно представить изменение

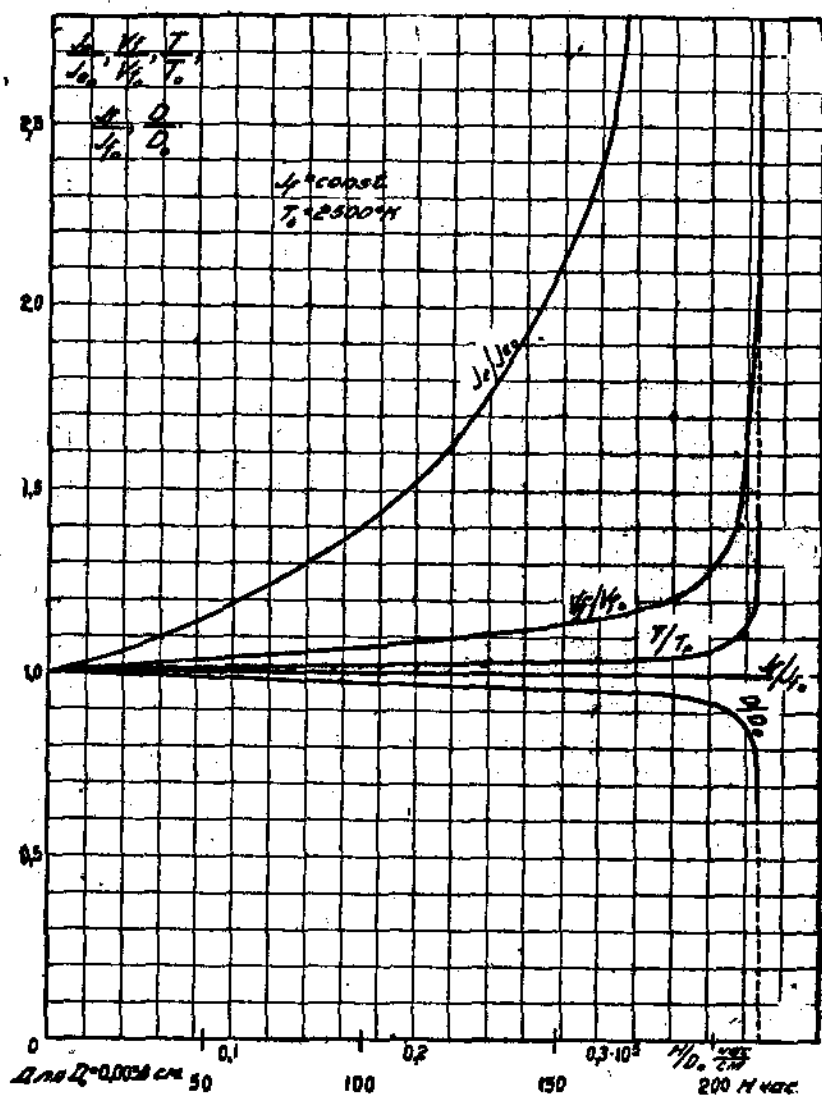


Рис. 295. Изменение характеристик катода с течением времени при $I = \text{const.}$

температуры катода не в функции времени, а в функции изменения диаметра, что и сделано на рис. 296 для различных начальных температур катода. Из кривых видно, что чем выше начальная температура, тем при меньшем изменении диаметра она достигает температуры плавления. Так, например, при начальной температуре катода 2500°K , она достигает значения точки плавления

вольфрама 3655° К при уменьшении диаметра до 0,655 первоначальной величины, тогда как при начальной температуре 2800° К точка плавления достигается при уменьшении диаметра до 0,745 первоначального значения. Кривые рис. 296 выражают указанную зависимость при условии постоянства тока накала.

с. *Срок службы катода при постоянном напряжении накала.* Постоянство напряжения накала катода отвечает большинству случаев эксплуатации электронных ламп.

Для решения интеграла (280) и определения срока службы катода при постоянном напряжении накала требуется, как и в предыдущих случаях, определить зависимость скорости испарения вольфрама от изменения диаметра.

Выведем эту зависимость для идеального случая. Учет охлажденных концов, сделанный по средней температуре между начальной и конечной для не слишком большого изменения диаметра, дает, как нетрудно показать, ту же формулу для срока службы, только в ней начальная скорость испарения v_0 должна быть заменена средней скоростью v_c , отвечающей средней температуре в указанных пределах изменения диаметра.

Из основной формулы (257) имеем:

$$I = W \frac{I^3}{V^3} = A D^{3/2} = k_8 T^{n_1 + 2v_2} \frac{I^3}{V^3} = k_7 T^{\frac{v_2 - v_1}{2}} D^{3/2}; \quad (298)$$

откуда:

$$T = \left[\frac{k_7}{k_8} \left(\frac{V}{I} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3(v_1 + v_2)}} D^{\frac{1}{v_1 + v_2}}; \quad (299)$$

подставляя значение T из ур-ния (299) в формулу для скорости испарения,

$$v = k_8 T^{v_2} = \alpha D^{\beta},$$

где α — постоянная величина при $V = \text{const}$, а $\beta = \frac{v_2}{v_1 + v_2} = 6,06$.

Найденную зависимость скорости испарения от изменения диаметра получим:

ставим в интеграл (280) и, приняв во внимание, что $v_0 = \alpha D_0^{-\beta}$, получим:

$$H = - \frac{\gamma}{2} \int_{D_0}^D \frac{dD}{\alpha D^{\beta}} = \frac{\gamma D_0}{2v_0 (\beta - 1)} \frac{1 - k^{\beta-1}}{k^{\beta-1}} = \frac{\gamma D_0}{2v_0} \frac{1 - k^{5,06}}{5,06 k^{5,06}}, \quad (300)$$

или

$$\frac{H}{D_0} = \frac{\gamma}{2v_0} \frac{1}{3600} \frac{1 - k^{5,06}}{5,06 k^{5,06}} \left[\frac{\text{час}}{\text{см}} \right], \quad (301)$$

т. е. при $V = \text{const}$ (в идеальном случае) катод не сгорит, а потухнет, и срок службы равен бесконечности.

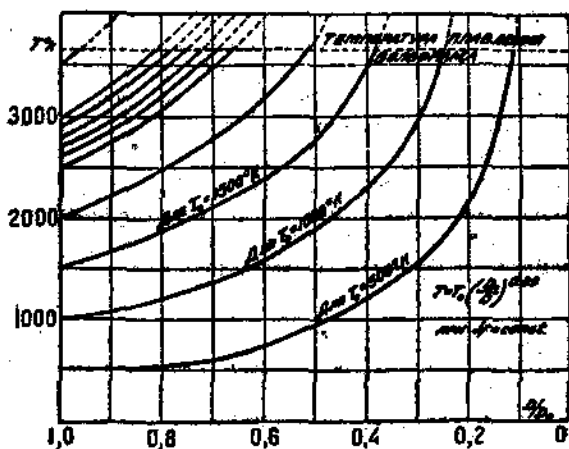


Рис. 296. Повышение температуры катода при уменьшении диаметра нити и при $I = \text{const}$.

Это следует, как будет пока зано ниже, из того обстоятельства, что температура катода с течением времени понижается.

Таким образом, в идеальном случае при поддержании постоянного напряжения на катоде, последний сначала быстро, затем все медленнее и медленнее уменьшается в диаметре и постепенно гаснет, не перегорая, так как по достижении некоторого малого диаметра температура его настолько понизится, что скорость испарения будет ничтожно мала и дальнейшее уменьшение диаметра будет идти бесконечно медленно.

Конечно это есть теоретический вывод; практически же всегда имеется много других причин, в силу которых катод может разрушиться, и кроме того вывод этот сделан без учета охлажденных концов, влияние которых может значительно изменить результаты, особенно же характер кривой уменьшения диаметра в функции времени под конец срока службы катода.

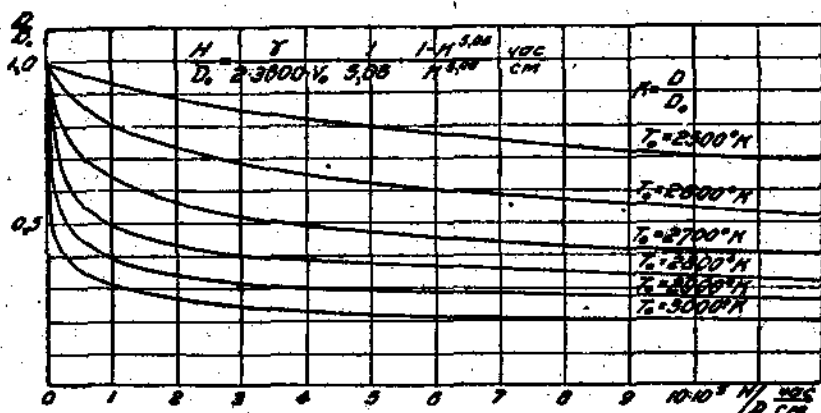


Рис. 297. Сроки службы катода при различных $V = \text{const}$.

Для случая постоянства напряжения получаем следующие зависимости температуры тока накала, эмиссии катода от изменения диаметра:

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 k_0^{\frac{1}{v_1 + v_2}} = T_0 k_0^{0.175}, \\ I &= I_0 k_0^{\frac{v_2 + v_1}{2v_2 + v_1}} = I_0 k_0^{1.75}, \\ I_0 &= I_{00} k_0^{\frac{v_4}{v_3 + v_1} + 1} = I_{00} k_0^{1.86} \end{aligned} \right\} \quad (302)$$

На рис. 297 и 298 представлены кривые, относящиеся к случаю постоянного напряжения накала.

Следует отметить, что в действительном, а не идеальном случае, когда с охлажденными концами катода приходится считаться, температура катода в зависимости от величины охлажденных концов или длины его с течением времени может увеличиваться, уменьшаться или оставаться постоянной, а следовательно, и скорость испарения может быть больше или меньше начальной скорости.

Это обстоятельство в свою очередь влияет на срок службы катода, уменьшая его до значения срока службы при постоянной температуре (ур-ние 283), а при повышении температуры уменьшая его и еще более значительно.

Увеличение температуры, особенно при коротком катоде, может происходить за счет уменьшения тока накала (при уменьшении диаметра); следствием этого является уменьшение потери напряжения в охлажденных концах; диаметр которых практически остается начальным. На среднюю часть катода, с уменьшением диаметра, будет приходиться большая часть из общего приложенного к катоду постоянного напряжения, а это в некоторых случаях может не только поднять температуру катода до начального значения, но и увеличить ее до величины, большей начальной.

На рис. 299 дано примерное графическое представление вышесказанного. По оси абсцисс отложена температура катода, по оси ординат — ток накала. На чертеже показаны кривые:

$$I = A D_0^{3/2}; \quad I = A (0,9 D_0)^{3/2} \text{ и т. д.}$$

и кривые:

$$I = W \frac{V^3}{V_0^3}; \quad I = W \frac{V^3}{V_1^3} \text{ и т. д.}$$

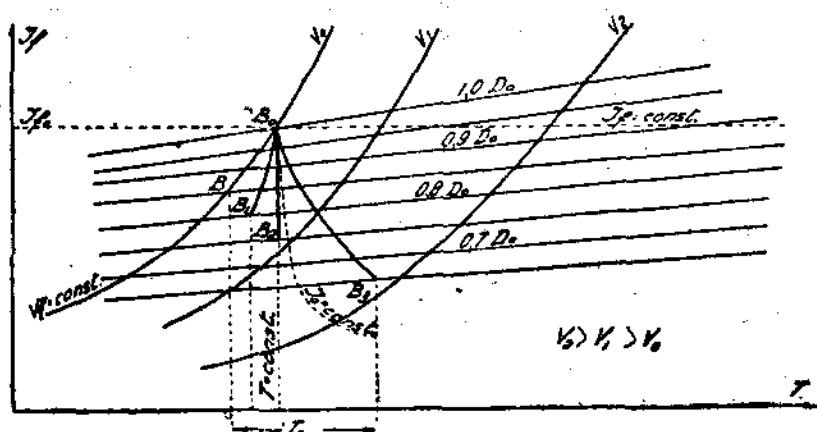


Рис. 299. Диаграмма изменения параметров катода при различных условиях срока службы (по М. Ситникову).

Точка B_0 соответствует начальным данным состояния катода: начальному диаметру D_0 , току накала I_0 , фактическому напряжению на средней части катода V_0 на длине его l и начальной температуре катода T_0 .

По мере уменьшения диаметра катода фактическое напряжение накала V_1 , V_2 на длине катода l увеличивается ($V_1 > V_0$; $V_2 > V_1$) и кривая состояния

катода с течением времени (или с уменьшением диаметра) может пойти либо по кривой B_0B_1 , либо по кривой B_0B_2 , либо по B_0B_3 ; при этом в первом случае температура катода в его средней части уменьшается, во втором остается постоянной, а в третьем — возрастает.

В идеальном случае, когда фактически на средней части катода напряжение остается постоянным, состояние катода с течением времени изменяется по кривой B_0B , аналитическое выражение которой:

$$I = W \frac{l^3}{V_0^2} \quad (302)$$

и температура катода будет уменьшаться больше, чем в других случаях. Срок службы будет тем больше, чем сильнее уменьшается температура. При том же времени горения катода, диаметр его уменьшится тем значительней, чем сильнее увеличивается температура катода. (Точка B_3 соответствует большему изменению диаметра сравнительно с точкой B_1 и т. д.)

Ход кривой изменения состояния катода зависит от его длины или его напряжения накала.

Кривая состояния B_0B соответствует бесконечно длинному катоду. При уменьшении длины катода кривая состояния пойдет по кривой B_0B_2 , при еще более коротком катоде, или при большем количестве охлажденных концов, как это имеет место в лампах накаливания, — по кривой B_0B_3 , причем будет иметь место возрастание температуры. Таким образом, при конструировании ламп накаливания приходится учитывать количество охлажденных концов или точек крепления нити, а также степень охлаждения нити в месте крепления, при расчете их на максимальный срок службы. Очевидно, что крепление нити более толстыми поддерживающими крючками вызовет большее охлаждение нити в месте соприкосновения, а это отразится в сторону уменьшения срока службы. То же можно сказать и относительно большего количества точек крепления нити (в лампах накаливания от 10 до 20 и больше), так как это уменьшает действующую длину нити.

Все изложенное можно проследить на рис. 299. На нем видны также кривые изменения состояния катода в четырех различных случаях срока службы: кривая B_0B_3 соответствует случаю первому ($T = \text{const}$), кривая B_0B — случаю третьему ($V = \text{const}$) и кривая, проведенная из точки B_0 параллельно оси абсцисс, второму случаю ($I = \text{const}$). Для четвертого случая ($I_0 = \text{const}$) изменение состояния примерно выразится кривой, указанной пунктиром.

d. Срок службы катода при условии постоянства эмиссии катода. Практически этот случай имеет место для катодов высоковольтных кенотронов, трубок Кулиджа и других, где накал поддерживается таким, чтобы он давал определенную эмиссию.

Для нахождения интеграла (280) в данном случае (постоянство эмиссии) нужно, как и в предыдущих случаях, найти зависимость между изменением диаметра и скоростью испарения вольфрама в данных условиях. Рассмотрим идеальный случай.

Эмиссия катода выражается таким образом:

$$I_0 = \pi D l k_1 T^{11}; \quad (303)$$

откуда найдем, что

$$T = \left(\frac{I_0}{k_1 \pi l} \right)^{\frac{1}{11}} D^{-\frac{1}{11}}; \quad (304)$$

следовательно для скорости испарения v , при условии $I_e = \text{const}$, получим:

$$v = k_3 T^{1/2} = k_3 \left(\frac{I_e}{k_4 \pi l} \right)^{1/4} D^{-1/4} = \alpha D^{-1/4}, \quad (305)$$

где:

$$\alpha = \text{const } \beta = \frac{v_2}{v_1} = 0,57.$$

Интегрируя ур-ние (280) и замечая, что $v_0 = \alpha D_0^{-1/4}$, найдем для срока службы выражение:

$$\left. \begin{aligned} H &= -\frac{\gamma}{2} \int_{D_0}^D \frac{D^3 dD}{\alpha} = \frac{\gamma D_0}{2v_0} \frac{1 - k^{\beta+1}}{\beta+1}, \\ \text{или} \quad \frac{H}{D_0} &= \frac{\gamma}{2v_0 8600} \frac{1 - k^{2,57}}{2,57} \left[\frac{\text{час}}{\text{см}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (306)$$

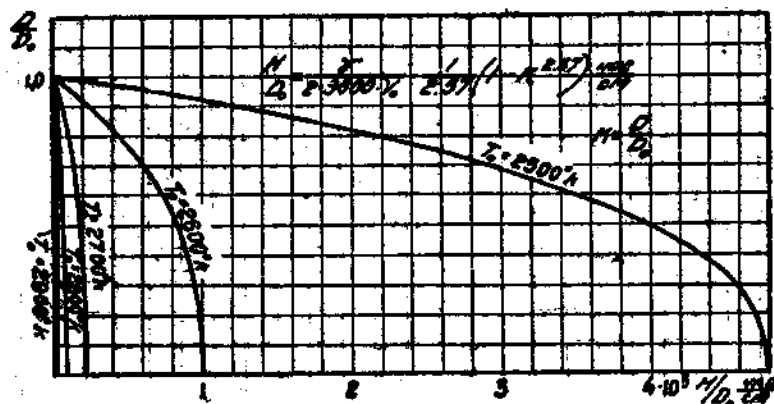


Рис. 300. Сроки службы катода при различных $I_e = \text{const}$.

Формула для срока службы похожа на формулу (296) второго случая ($I = \text{const}$), но отличается тем, что уменьшение диаметра происходит менее резко, особенно под конец срока службы.

В этом случае зависимости температуры, тока накала, напряжения накала от уменьшения диаметра, при условии постоянства эмиссии, будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} I &= I_0 k^{\frac{1/2 - v_1 - v_2}{2v_1}} = I_0 k^{1,08}, \\ T &= T_0 k^{\frac{1}{v_1}} = T_0 k^{0,0455}, \\ V &= V_0 k^{\frac{v_1 + v_2 + v_3}{2v_1}} = V_0 k^{0,08} \end{aligned} \right\} \quad (307)$$

На рис. 300 и 301 представлены кривые, относящиеся к данному случаю. Кривые изменения диаметра на рис. 300 и 301 начерчены сплошными линиями, так как хотя и происходит увеличение температуры, но сравнительно

очень медленно и температура не успевает подняться до точки плавления, как это имело место в разобранным ранее случае при постоянном токе накала (рис. 249).

Действительно, при начальной температуре катода 2500°K температура достигает точки плавления лишь при уменьшении диаметра до 0,00024 начальной величины.

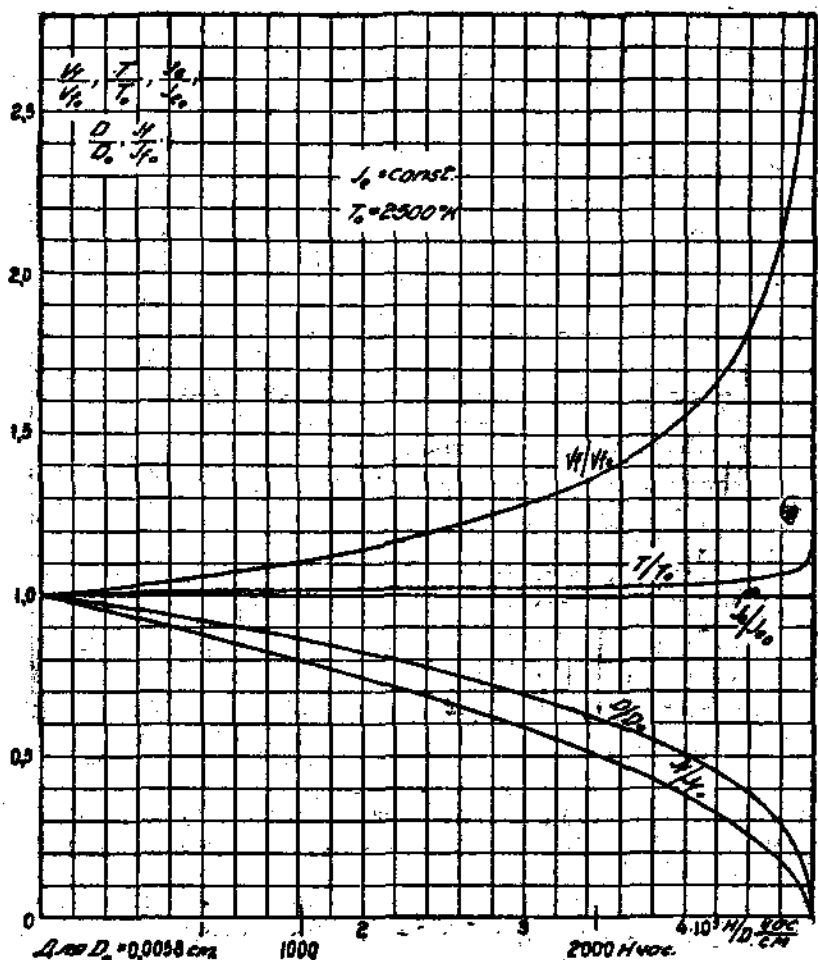


Рис. 301. Изменение характеристик катода с течением времени при $I_0 = \text{const.}$

На рис. 302 представлены кривые изменения температуры в функции уменьшения диаметра для разобранных четырех случаев и для начальной температуры $T_0 = 2500^{\circ}\text{K}$.

Следует отметить, что все указанные зависимости изменения температуры, тока накала, напряжения накала и эмиссии катода в функции диаметра являются следствием испарения вольфрама с течением времени, так что правильнее было бы эти зависимости представить в функции времени, но при этом они имели бы значительно более сложный вид.

в. Сравнение срока службы катода для рассмотренных случаев. Обозначим срок службы катода буквой H с индексом справа внизу, указывающим, какому условию отвечает данный срок службы, и введем коэффициент

$C_0 = \frac{\gamma}{2\sigma_0 3600}$; тогда получим для сроков службы формулы:

$$\left. \begin{aligned} H_I &= C_0 D_0 k_I, & H_{II} &= C_0 D_0 k_{II}, \\ H_T &= C_0 D_0 k_{III}, & H_V &= C_0 D_0 k_{IV}, \end{aligned} \right\} \quad (308)$$

где $k_I = 0,0314(1 - k^{31,9})$, $k_{II} = 0,389(1 - k^{2,57})$, $k_{III} = 1 - k$, $k_{IV} = -0,198(1 - k^{-5,08})$.

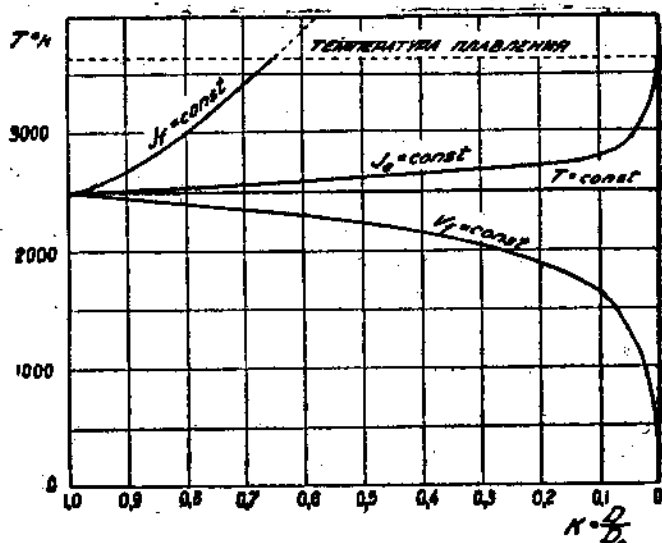


Рис. 302. Температура катода в функции изменения диаметра нити при различных условиях работы катода (по М. Ситникову).

Из них видно, что уменьшение диаметра до величины $D \doteq 0,9 D_0$, или уменьшение диаметра на 10%, что обычно принято считать за срок службы катода, происходит быстрее всего при условии постоянства тока накала. Если принять этот срок службы за единицу, то при условии постоянной эмиссии срок службы увеличивается в 3,06 раза, при условии постоянства температуры — в 3,31 раза и для постоянного напряжения накала возрастет в 4,63 раза.

Кривые рис. 303 показывают уменьшение диаметра катода в функции времени для начальной температуры катода $T = 2500^\circ \text{K}$ и для различных условий службы катода $V = \text{const}$, $T = \text{const}$, $I_e = \text{const}$ и $I = \text{const}$.

Из сравнения срока службы катода, поставленного в различные условия, следует, что условия эти далеко не безразличны для продолжительности службы катода, а поэтому и должны учитываться при выборе той или другой формы его эксплуатации. Эксплуатация катода в условиях постоянства тока накала (включение баррета) должна быть отнесена к наименее выгодной с точки зрения продолжительности службы. Эксплуатация катода в условиях постоянства напряжения накала в идеальном случае дает наибольший срок службы катода; в действительных же условиях, в зависимости от отношения величин

охлажденных концов (функция температуры катода) к общему напряжению накала, этот срок службы повышается и притом тем больше, чем больше это отношение. Иногда срок службы может при этом оказаться менее, чем при $I_c = \text{const}$.

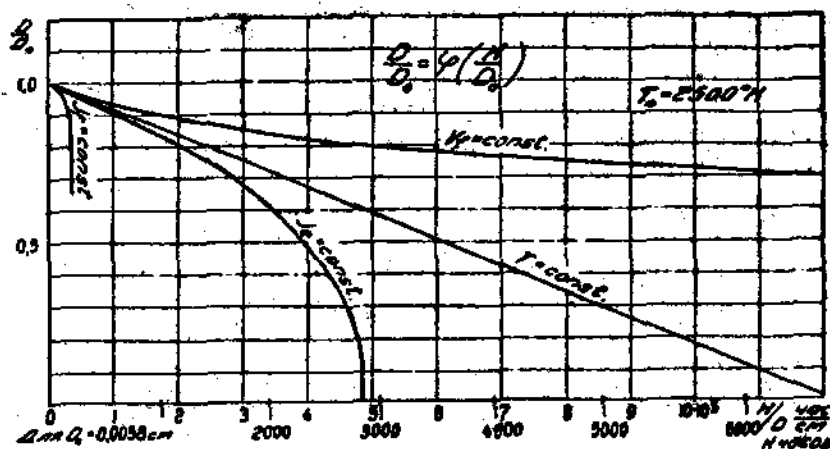


Рис. 303. Изменение диаметра нити при различных условиях работы катода (по М. Ситникову).

4. Кривые равного срока службы катода.

На рис. 304 и 305 даны кривые изменения тока накала для различных диаметров в функции температуры и нанесены кривые равного срока службы катода для $H=400$ час., $H=800$ час. и $H=2000$ час. Кривые равного

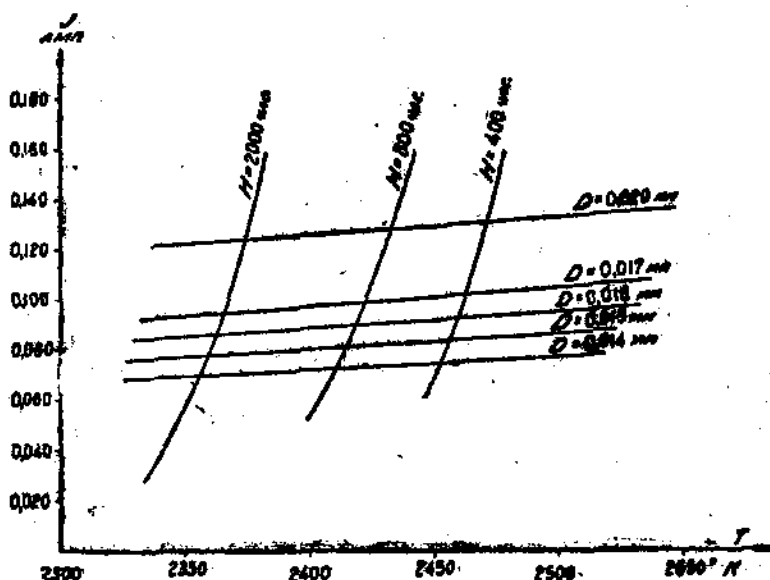


Рис. 304. Кривые изменения тока накала в функции температуры и кривые равного срока службы катода для нитей диаметром от 0,014 до 0,020 мм.

сроки вычислены в предположении постоянства температуры $T = \text{const}$ во время горения катода и уменьшения диаметра катода на 10% .

Заканчивая рассмотрение срока службы катода, укажем на один пример расчета катода на основании выведенных формул и кривых. Пусть требуется определить, как сильно сказывается изменение диаметра катода на его эмиссию при условии постоянства напряжения накала и длины. По рис. 298 или по формулам (302) и (274) находим, что уменьшение диаметра на $5-12\%$ вызывает уменьшение эмиссии на $22-47\%$.

В полученных теоретических формулах для срока службы катода практика несомненно вносит свои поправки и исправления.

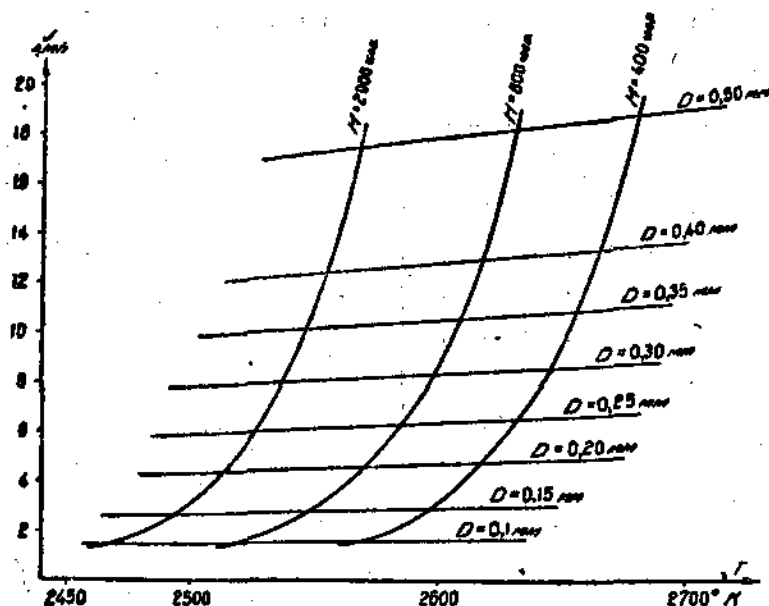


Рис. 305. Кривые изменения тока накала в функции температуры и кривые равного срока службы катода для нитей диаметром от 0,10 до 0,50 мм.

Диаметр катода, конечно, не может так плавно и постепенно уменьшаться до нуля, как требуется теорией, так как всегда имеются другие причины, как-то: механическая прочность нити, ее перекристаллизация, наложение эмиссионного тока на ток накала и пр., которые повлекут за собой разрушение катода раньше теоретического срока службы.

Кроме того, особенно при больших температурах, случайное, более усиленное испарение в одном месте катода может повлечь за собой резкое изменение диаметра на каком-либо участке, что и вызовет разрушение катода значительно раньше, чем то следует теоретически.

Для первого и второго из рассмотренных случаев ($T = \text{const}$ и $I = \text{const}$) вывод для срока службы не зависит от охлажденных концов катода, поэтому он является справедливым и для действительного случая.

Что касается двух последних выводов величины срока службы при $V = \text{const}$ и при $I_e = \text{const}$, сделанных для идеального случая без учета влияния охлажденных концов, то они для действительного случая не подходят; введение учета охлажденных концов в вывод последних двух зависимостей приводит

к нахождению определенных интегралов (280), не берущихся в конечном виде; приближенное же значение их может быть получено путем разложения в ряды.

В таблице 58 даны значения скорости испарения и упругости паров вольфрама, молибдена и платины по данным Дэшмана.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

ТОРИРОВАННЫЙ ВОЛЬФРАМОВЫЙ КАТОД.

1. Зависимость эмиссии от температуры и активности поверхностного слоя.

Вольфрамовая нить, содержащая примесь тория в количестве от 1,0 до 1,5%, существенно отличается от чисто вольфрамовой нити в отношении испускания электронов. Если на поверхности такой нити образован мономолекулярный слой

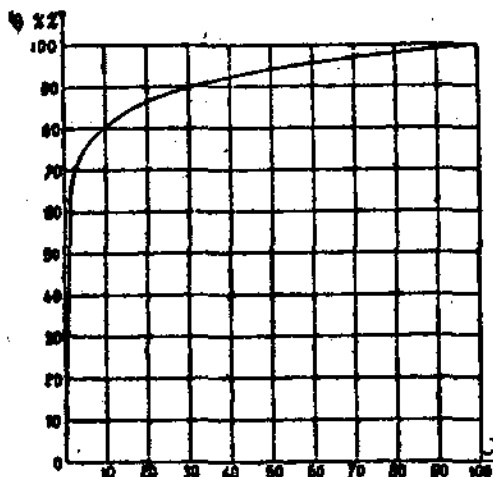


Рис. 306. Зависимость эмиссии торированного вольфрамового катода от величины θ по Лангмиру.

металлического тория, то эмиссия нити сильно возрастает и при температуре нити 2000—2100° К она достигает в средней ее части (без учета влияния охлажденных концов) 118,0 миллиампер на ватт. Дальнейшее повышение температуры, как это следует ожидать, должно было бы дать дальнейший рост эмиссии. Но с повышением температуры наблюдается быстрое падение эмиссии, и при температуре в 2300° К эмиссия практически становится такой же, как и для чистого вольфрама. Объяснение этого явления заключается в том, что мономолекулярный слой атомов тория на поверхности представляет собой динамическое явление, так как все время происходит замещение испаряющихся атомов тория вновь выходящими

атомами из глубины нити вследствие диффузии тория через вольфрам. Лангмиром введено понятие коэффициента покрытия поверхности нити торием θ . Коэффициент θ , даваемый обычно в процентах, представляет собой отношение действительного числа атомов тория на поверхности нити в 1 см² к полному числу атомов тория в мономолекулярном слое тория на 1 см², выраженное в процентах.

Процентное покрытие нити торием достигает значения 100% при температуре меньшей 1700° К (99,965% при 1400° К), а затем, по мере увеличения температуры, θ уменьшается, достигая значения 55% при 2200° К и 6% при 2400° К. С повышением температуры скорость диффузии увеличивается, но скорость испарения так же растет. В результате процентное покрытие поверхности нити торием все время уменьшается.

Эмиссия очень сильно зависит от функции θ при данной температуре. На рис. 306 дана зависимость эмиссии в функции θ , процентного покрытия нити торием. Из кривой видно, что уже при $\theta = 90\%$, т. е. при уменьшении числа

В о д ь ф р а з м			М о л ь б л а з н			П л а т к и з н		
Т° К	Скорость испарения ϕ г см ² сек ⁻¹	Уплотность паров ρ мм рт. ст.	Т° К	Скорость испарения ϕ г см ² сек ⁻¹	Уплотность паров ρ мм рт. ст.	Т° К	Скорость испарения ϕ г см ² сек ⁻¹	Уплотность паров ρ мм рт. ст.
2000	114 $\times 10^{-12}$	6,45 $\times 10^{-12}$	1800	0,0863 $\times 10^{-2}$	6,43 $\times 10^{-2}$	1000	8,32 $\times 10^{-20}$	324 $\times 10^{-20}$
2100	1,44 $\times 10^{-12}$	83,2 $\times 10^{-12}$	1850	0,318 $\times 10^{-2}$	23,5 $\times 10^{-2}$	1050	161 $\times 10^{-20}$	6415 $\times 10^{-20}$
2200	14,4 $\times 10^{-12}$	849 $\times 10^{-12}$	1900	1,057 $\times 10^{-2}$	80,8 $\times 10^{-2}$	1100	0,238 $\times 10^{-18}$	9,7 $\times 10^{-18}$
2300	116,7 $\times 10^{-12}$	7,05 $\times 10^{-2}$	1950	3,72 $\times 10^{-2}$	288 $\times 10^{-2}$	1150	2,75 $\times 10^{-18}$	115 $\times 10^{-18}$
2400	798 $\times 10^{-12}$	49,2 $\times 10^{-2}$	2000	10 $\times 10^{-2}$	789 $\times 10^{-2}$	1200	26,0 $\times 10^{-18}$	1110 $\times 10^{-18}$
2500	4,67 $\times 10^{-2}$	294 $\times 10^{-2}$	2050	0,0283 $\times 10^{-2}$	2,24 $\times 10^{-2}$	1250	204 $\times 10^{-18}$	8910 $\times 10^{-18}$
2600	23,6 $\times 10^{-2}$	1,51 $\times 10^{-2}$	2100	0,0763 $\times 10^{-2}$	6,12 $\times 10^{-2}$	1300	0,137 $\times 10^{-12}$	6,11 $\times 10^{-12}$
2700	106 $\times 10^{-2}$	6,95 $\times 10^{-2}$	2150	0,196 $\times 10^{-2}$	15,9 $\times 10^{-2}$	1350	0,791 $\times 10^{-12}$	36,2 $\times 10^{-12}$
2800	429 $\times 10^{-2}$	28,6 $\times 10^{-2}$	2200	0,480 $\times 10^{-2}$	39,6 $\times 10^{-2}$	1400	4,01 $\times 10^{-12}$	188 $\times 10^{-12}$
2900	1,57 $\times 10^{-2}$	106 $\times 10^{-2}$	2250	1,13 $\times 10^{-2}$	94,1 $\times 10^{-2}$	1450	18,5 $\times 10^{-12}$	867 $\times 10^{-12}$
3000	5,23 $\times 10^{-2}$	0,00362	2300	2,57 $\times 10^{-2}$	214 $\times 10^{-2}$	1500	75,4 $\times 10^{-12}$	3610 $\times 10^{-12}$
3100	16,3 $\times 10^{-2}$	0,00114	2350	5,64 $\times 10^{-2}$	479 $\times 10^{-2}$	1550	0,279 $\times 10^{-2}$	13,7 $\times 10^{-2}$
3200	46,7 $\times 10^{-2}$	0,00333	2400	12,0 $\times 10^{-2}$	1027 $\times 10^{-2}$	1600	0,966 $\times 10^{-2}$	48,4 $\times 10^{-2}$
3300	126 $\times 10^{-2}$	0,00910	2450	0,246 $\times 10^{-1}$	21,4 $\times 10^{-1}$	1650	3,11 $\times 10^{-2}$	156 $\times 10^{-2}$
3400	320 $\times 10^{-2}$	0,0234	2500	0,490 $\times 10^{-1}$	43,0 $\times 10^{-1}$	1700	9,06 $\times 10^{-2}$	465 $\times 10^{-2}$
3500	769 $\times 10^{-2}$	0,0572	2550	0,959 $\times 10^{-1}$	85 $\times 10^{-1}$	1750	25,4 $\times 10^{-2}$	1300 $\times 10^{-2}$
3540	0,00107	0,080	2600	1,79 $\times 10^{-1}$	160 $\times 10^{-1}$	1800	66,7 $\times 10^{-2}$	3500 $\times 10^{-2}$
5110	—	760	2650	3,30 $\times 10^{-1}$	298 $\times 10^{-1}$	1850	168 $\times 10^{-2}$	8800 $\times 10^{-2}$
—	—	—	2700	5,95 $\times 10^{-1}$	542 $\times 10^{-1}$	1900	0,397 $\times 10^{-2}$	21,3 $\times 10^{-2}$
—	—	—	2750	10,5 $\times 10^{-1}$	918 $\times 10^{-1}$	1950	0,920 $\times 10^{-2}$	49,5 $\times 10^{-2}$
—	—	—	2800	18,1 $\times 10^{-1}$	1679 $\times 10^{-1}$	2000	1,95 $\times 10^{-2}$	107 $\times 10^{-2}$
—	—	—	3800	—	760	2028	2,97 $\times 10^{-2}$	164 $\times 10^{-2}$
—	—	—	—	—	—	4180	—	760

атомов тория на поверхности нити всего на 10%, эмиссия нити составляет всего 30% от максимальной. Поэтому вначале, при возрастании температуры, происходит увеличение эмиссии, так как благоприятное действие увеличения эмиссии из-за повышения температуры преобладает над неблагоприятным действием уменьшения эмиссии из-за уменьшения степени покрытия нити торием.

На рис. 307 дано значение устойчивой эмиссии $i' \frac{\text{mA}}{\text{W}}$ в функции температуры для торированной нити и значение θ процентного покрытия нити

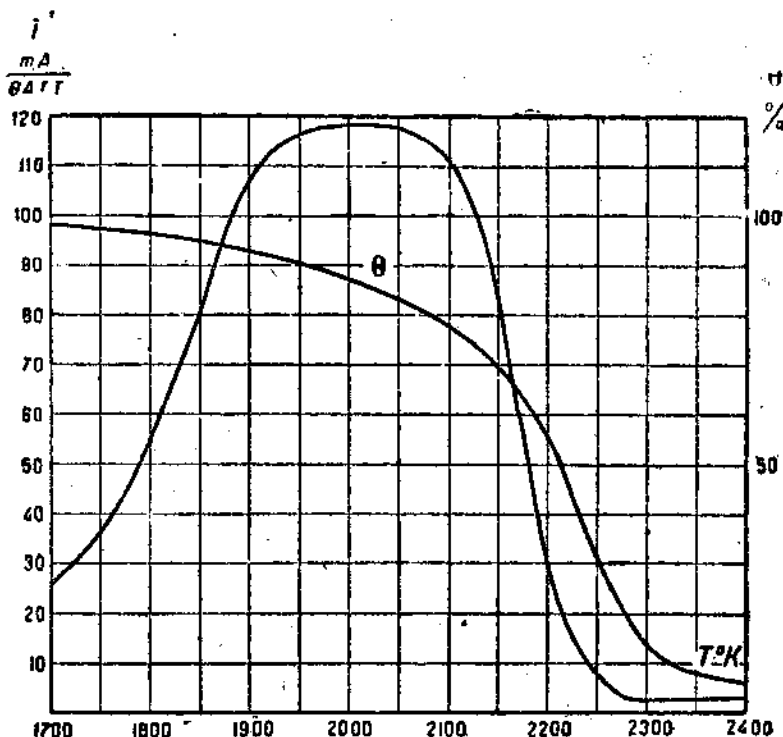


Рис. 307. Характеристики вольфрамовой торированной катодной нити по Лангмуну.

торием. Значение θ соответствует устойчивому значению процентного покрытия нити торием. Кривая эмиссии $(i' \frac{\text{mA}}{\text{W}})$ имеет резко выраженный максимум при температуре от 1950° К до температуры 2100° К. Такой характер эмиссии объясняется тем, что вначале, когда процентное покрытие нити торием больше 80%, увеличение эмиссии происходит за счет повышения температуры. Но при дальнейшем повышении температуры происходит обеднение поверхности торием, что сказывается сильнее (см. резкое падение эмиссии на рис. 306 для значений θ меньших 80%), чем увеличение эмиссии из-за повышения температуры. Закон нарастания эмиссии в зависимости от температуры может быть представлен в виде:

$$i' = kT,$$

тогда как для зависимости эмиссии I_e от процентного покрытия нити торием θ Лангмуир дает следующую зависимость: ¹

$$\log \frac{I_{\max}}{I_e} = k(1 - \theta), \quad (309)$$

где $k = 5,12$ и $I_{\max}$ — максимальная возможная эмиссия нити для данной температуры и полного ($\theta = 1,00$) покрытия нити торием. (θ в данной формуле дано не в процентном отношении, а как отношение действительного числа атомов тория к полному числу атомов тория в мономолекулярном слое.)

Таким образом кривая эмиссии в функции температуры, данная на рис. 307, представляет собой кривую для все время меняющегося (уменьшающегося) значения θ . Причем значение θ есть значение устойчивого состояния. Поэтому, если торированной нити, работающей, например, при температуре 2100°K , дать внезапный перекал до температуры 2150°K , то в первый момент число атомов тория останется прежним (θ_{2100}) и, так как температура увеличилась, увеличится и эмиссия. Если при температуре 2100°K эмиссия была $112 \frac{\text{mA}}{\text{W}}$, то при температуре 2150°K в первый момент эмиссия будет порядка $130 \frac{\text{mA}}{\text{W}}$, но затем очень быстро упадет (так как уменьшится θ) до величины устойчивой эмиссии, определяемой по кривой рис. 307 для 2150°K в $85 \frac{\text{mA}}{\text{W}}$.

Кривые рис. 306 и 307 даны на основании данных Лангмуира, ² приведенных в таблице 59. Обычно катоды из торированного вольфрама эксплуатируются при температуре средней части катода в $2070 - 2080^\circ \text{K}$.

Таблица 59.

$T^\circ \text{K}$	A/cm^2	θ	$T^\circ \text{K}$	A/cm^2	θ
1300	—	0,99997	2200	1,24	0,551
1400	$3,12 \times 10^{-4}$	0,99975	2300	0,114	0,139
1600	0,0812		2400	0,168	0,0601
1700	0,287		2500	0,357	
1800	0,772	0,9605	2600	0,774	
1900	1,59	0,9191	2800	3,48	0,0088
2000	2,89	0,8713	3000	13,5	0,0041
2100	3,43	0,781			

Расчет торированного катода такой же как и вольфрамового, так как излучение, удельное сопротивление, скорость испарения и влияние охлажденных концов остаются практически теми же самыми. Изменение происходит только в величине эмиссии, в функции температуры. Так как задача расчета заклю-

¹ I. Langmuir. Phys. Rev., Vol. 22, 1923, p. 148.

² Langmuir. Phys. Rev. Vol. 22, oct. 1923.

чается в том, чтобы определить все параметры катода (длину, диаметр, вольты накала, ток накала) для получения определенной температуры, задаваемой из условий и величины срока службы (который в свою очередь зависит от диаметра нити), то и весь ход расчета остается по существу тем же самым. При определении эмиссии по последней формуле:

$$I_e = i' IV - I(2\Delta V_E - 2\Delta V_B)] \quad (268)$$

следует вместо значения i' по таблице или кривым (рис. 283) для чистого вольфрама для заданной температуры взять значение по кривой рис. 307 для торированного вольфрама).¹ Правда распределение эмиссии на охлажденном конце, данное для вольфрамовой нити на рис. 279, будет иное для торированной нити, так как кроме изменения ее температуры по определенной кривой (кривая А рис. 279) вдоль по нити будет происходить и изменение устойчивого значения θ , которое будет увеличиваться или уменьшаться, идя по ней от середины к концу в зависимости от предшествовавшей ее тренировки (была ли температура выше или ниже температуры в настоящий момент) и от абсолютного значения температуры нити в средней части: температура больше или меньше температуры, при которой имеет место максимум устойчивой эмиссии (около 2000° К).

Поправку на это явление легко можно произвести графически на основании приведенного выше материала. Вообще говоря, величина этой поправки есть величина второго порядка, а потому она и не так существенна.

2. Диффузия и испарение тория и процесс тренировки торированной нити.

В таблице 60² даны значения диффузии тория через вольфрам и скорость испарения атомов тория с поверхности вольфрама в функции температуры. Следует указать, что из теоретических соображений Лангмуир дает значение числа атомов тория на 1 см² поверхности вольфрама для мономолекулярного слоя тория равное $1,5 \times 10^{13}$ атомов тория на 1 см² поверхности. Поэтому в таблице 60 даны значения для испарения тория не в граммах с см² в 1 сек., а в виде числа атомов тория, испаряющихся с 1 см² поверхности в 1 сек. Эти данные легко можно пересчитать на граммы с см² в секунду.

Нормально торий находится внутри вольфрамовой нити в качестве окисла. Для получения свободного тория дают всей нити значительный перекал до 2800—3000° К на небольшой промежуток времени (секунды). Под влиянием высокой температуры окись тория разлагается, кислород выделяется из нити, а торий начинает медленно диффундировать к поверхности нити.

После перекала нити дается температура порядка 2400—2300°, при которой и происходит диффузия тория и обогащение поверхности нити торием. Диффузия идет тем быстрее, чем выше температура, и поэтому казалось бы, что операция обогащения поверхностного слоя торием должна идти при высокой температуре. Но с другой стороны повышение температуры вызывает увеличение испарения атомов тория, уже дошедших до поверхности.

¹ Общая отдача торированного катода порядка 40—50 $\frac{\text{мА}}{\text{W}}$, тогда как отдача в средней части катода порядка 70—75 $\frac{\text{мА}}{\text{W}}$. Такое значительное понижение общей отдачи происходит за счет вредного действия охлажденных концов. Поэтому учет их влияния крайне важен при производстве точного расчета.

² Langmuir, Phys. Rev., Vol. 22, oct. 1923.

Таблица 60.

Диффузия тория и испарение.

Т° К	Диффузия см ² сек ⁻¹	Испарение атомов с см ² сек ⁻¹	Т° К	Диффузия см ² сек ⁻¹	Испарение атомов с см ² сек ⁻¹
1400	$2,36 \times 10^{-18}$	0,445	2 200	$5,10 \times 10^{-10}$	$1,61 \times 10^{11}$
1500	$2,24 \times 10^{-18}$	58,5	2 300	$1,30 \times 10^{-9}$	$1,22 \times 10^{12}$
1600	$1,61 \times 10^{-18}$	$4,18 \times 10^8$	2 400	$3,06 \times 10^{-9}$	$7,80 \times 10^{12}$
1700	$9,15 \times 10^{-19}$	$1,81 \times 10^8$	2 500	$6,73 \times 10^{-9}$	$4,31 \times 10^{13}$
1800	$4,29 \times 10^{-19}$	$5,15 \times 10^8$	2 600	$1,39 \times 10^{-8}$	$2,08 \times 10^{14}$
1900	$1,71 \times 10^{-11}$	$1,03 \times 10^8$	2 800	$5,11 \times 10^{-8}$	$3,48 \times 10^{14}$
2000	$5,94 \times 10^{-11}$	$1,53 \times 10^8$	3 000	$1,58 \times 10^{-7}$	$3,92 \times 10^{15}$
2100	$1,83 \times 10^{-10}$	$1,75 \times 10^{10}$	—	—	—

Очевидно, что процесс обогащения поверхности нити торием или процесс "тренировки" должен быть строго рассчитан для того, чтобы за время процесса тренировки атомов тория израсходовалось (испарилось) по возможности меньше, ибо запас их в нити строго ограничен, и с другой стороны, чтобы процесс тренировки был не слишком длителен, что сказывается на повышении стоимости производства электронных ламп.

3. Распыление тория ионной бомбардировкой и способы защиты катода от распыления.

Кроме испарения тория с поверхности нити происходит и другое столь же неприятное явление, заключающееся в том, что при ударе иона о поверхность нити происходит удаление атомов нити с ее поверхности или распыление нити катода.

Скорость распыления зависит от скорости, с которой ион ударяется в катод. Лангмуир нашел, что скорость распыления пропорциональна квадрату разности потенциалов, которую прошел ион при своем движении к катоду. Но для ионов различных газов существуют различные значения критического потенциала или скорости, ниже которых вообще не происходит распыления.

В таблице 61 даны, по данным Лангмуира, значения критического потенциала $V_{кр}$ в вольтах для ионов различных газов. Кроме того, как показал Лангмуир, вероятность выбивания атома при ударе иона о поверхность, имеющую слой атомов тория, также различна для различных ионов. Величина $\frac{1}{n}$, данная в таблице, дает то число ударов ионов данного газа, которое соответствует выбиванию одного атома тория.

Так из таблицы 61 следует, что для аргона на каждые 12,5 ударов приходится один выбитый (распыленный) атом тория. Для неона уже нужно 43 удара, чтобы выбить один атом тория. Из таблицы 61 видно, что аргон является с этой точки зрения одним из самых нежелательных газов в электронном приборе, имеющем сложный катод с повышенной эмиссионной способностью (тори-

рованный). Это обстоятельство усугубляется еще тем, что применяющиеся при откачке пустотных приборов щелочные металлы (магний, натрий) для получения более совершенного вакуума как-раз не поглощают инертных газов. Нити нагоревшего катода не удается сделать стойкими в смысле постоянства эмиссии для мощных ламп или вернее для ламп с большим анодным напряжением, так как распыление катода настолько резко повышается, что эмиссия практически очень быстро падает до нуля. Действительно при повышении напряжения, например с 50 вольт до 500, скорость распыления катода увеличивается в 100 раз. Существует много работ, направленных к защите катода от распыления.

ТАБЛИЦА 61.

Г а з	$V_{кр.}$	λ	$\frac{1}{n}$
H	> 600	0,000	∞
Ne	45	0,023	43,5
Ar	47	0,080	12,5
Ca	52	0,084	11,9
Hg	55	0,044	22,7
He	35	0,00015	6 680,0

Для устранения этого крайне нежелательного явления М. Ситниковым был разработан способ защиты катодов от распыления,¹ заключающийся в том, что особой формой электродов, а также дополнительных электродов или экрана, силовым линиям электрического поля между катодом и другими электродами придается такая форма, чтоб близь катода силовые линии имели большую кривизну, резко заворачиваясь близь него. Тогда электроны, при своем движении от катода к другим электродам (сетка, анод), будут следовать изгибу или изгибам силовых линий, так как в начале скорость электрона небольшая и он будет немного отклоняться от движения по силовым линиям. Но ионы будут двигаться иначе. Образованные где-то в пространстве между электродами ионы начнут также приближаться, двигаться по силовой линии по направлению к катоду. Но, приблизившись к катоду до места, где силовая линия имеет резкий, или крутой изгиб, ион по инерции не сможет следовать по силовой линии, отклонится от нее и не попадет в катод лампы. Правда ионы, образованные при столкновении электрона вблизи катода, не успеют приобрести большой скорости, чтобы „сорваться“ с пути по силовой линии и потому могут ударяться в катод, но такие ионы не опасны, так как будут слабо распылять катод по причине их малой скорости, или живой силы.

Такого рода катод может быть выполнен в виде плоской ленты, обращенной ребром к поверхности анода. Ребро ленты катода будет наиболее подвержено ионной бомбардировке, а плоская часть будет защищена от нее.

Выпрямители типа Rectron, в которых применен этого рода катод, описаны ранее в отделе стеклянных ртутных выпрямителей.

¹ Заявочное свидетельство № 14712 от 16 апреля 1927 года и патенты № 17506 и 17507.

4. Срок службы торированного катода.

Рабочая температура катода из торированного вольфрама настолько низка (2000—2100° K), что практически, можно сказать, не происходит испарения вольфрама и следовательно уменьшения диаметра катода. Таким образом, мы имеем новые условия срока службы при постоянном диаметре $D = \text{const}$, а следовательно и при постоянной температуре $T = \text{const}$, так как уменьшение диаметра вследствие испарения тория, который содержится всего в количестве 1—1,5%, ничтожно. Скорее можно говорить о том, что весь катод станет более рыхлым, так как из него сначала помощью диффузии, а затем испарения „выгорит“ примесь почти всего свободного тория. Таким образом, во все время срока службы катод будет практически иметь постоянными все параметры за исключением степени покрытия поверхности нити торием и следствием этого величины электронной эмиссии.

Дадим только самую общую формулировку, позволяющую судить о скорости испарения тория.¹

Срок службы торированного катода зависит от четырех основных факторов:

Первый фактор — это количественный запас свободных атомов тория в толще всего катода. Количество атомов тория на поверхности составляет для обычных катодов всего лишь 1/400—1/700 часть общего числа атомов тория. Таким образом запас атомов тория составляет от 400 до 700 мономолекулярных слоев тория на поверхности. За время срока службы поверхность как бы обновится и переменит весь состав атомов тория от 400 до 700 раз. Процесс тренировки иногда поглощает большое количество атомов тория. Поэтому выпускаемые катоды в готовых лампах, в зависимости от предшествующей их термической обработки (тренировки с целью получения удовлетворительной эмиссии), хотя и имеют равную эмиссию, могут существенно различаться по тем запасам тория, какими они в этот момент обладают. Это обстоятельство ватрудняет вопрос об определении срока службы готовой лампы, если неизвестны все обстоятельства предшествовавшей тренировки, так как наличный запас тория неизвестен. Поэтому расчет срока службы следовало бы делать, принимая во внимание всю историю тренировки нити. Но так как производство ламп имеет в большей или меньшей мере постоянный характер, то можно принять некоторую среднюю потерю запаса тория при тренировке. Наше исследование дало нам данные, которые указывают, что потеря эта колеблется от 5 и до 30 и больше процентов общего запаса. Примем в среднем потерю запаса тория при тренировке катода в 20%, от первоначального запаса, который может быть определен из процентного (1,5%) содержания тория в вольфраме.

Мы делаем допущение, что в конце концов почти вся окись тория разложилась. Некоторым основанием к этому является то обстоятельство, что после потери нитью эмиссии, хотя и можно восстановить ее повторным перекалом и тренировкой, но вторичный срок службы обычно значительно меньше первого.

Правда бывают исключения, когда вторичный срок службы одного порядка с первым и даже его превышает. Но эти случаи редки и относятся к особо благоприятным условиям.

Второй фактор, определяющий срок службы нити, это — испарение тория с поверхности нити (табл. 60). Чем выше температура, тем скорость испа-

¹ Подробно этот вопрос освещается в работе М. Ситникова, посвященной расчету вольфрамового катода и готовящейся к печати в трудах Гос. физ.-тех. института ВСНХ.

рения больше, и срок службы меньше. Зависимость изменения скорости испарения тория от температуры примерно такая же, как и вольфрама, поэтому срок службы очень сильно зависит от температуры.

Третий фактор — это скорость диффузии атомов тория из внутренней части катода на поверхность. Диффузия растет с повышением температуры (табл. 60). В расчет этот фактор вводить не будем, так как для простоты считаем, что диффузия и скорость испарения идут, если можно так выразиться, параллельно друг другу. Хотя первое время горения нити обычно диффузия идет быстрее, происходит временное обогащение поверхности нити торием (в увелиливается), и эмиссия увеличивается. Затем эмиссия постепенно понижается, что указывает уже на то, что диффузия отстает от испарения.

Четвертый фактор — это распыление поверхности нити ионной бомбардировкой. Этот фактор учесть довольно трудно, так как неизвестен состав оставшихся ионов газа, а количество газа может с течением времени меняться. Поэтому имели место случаи, когда лампа с большим содержанием остатков газа (по величине нонного тока) вела себя вполне удовлетворительно в смысле постоянства эмиссии. В других же случаях при малом ионном токе происходило быстрое уменьшение эмиссии с течением времени. Можно думать, что в первом случае в лампе были остатки газов водорода или гелия, слабо распыляющих торий, а во втором случае аргон, неон или другие.

Не входя в дальнейшие подробности, позволим себе дать формулу, по которой можно в первом приближении определить срок службы или наглядно видеть, как сказываются на сроке службы указанные выше три фактора (запас, испарение, распыление). Формулу даем в общем виде, а численные значения коэффициентов предлагаемой формулы даем для конкретной нити, имеющей следующие данные: $l = 21,0$ мм, $D = 0,015$ мм, температуру от $2000 - 2100^\circ \text{K}$ и содержание тория $1,0\%$:

$$H = 2000 \frac{B}{b + \beta} = 2000 \frac{300}{(25 + 250) + 3,0 \times 10^{11}} \text{ часов}, \quad (310)$$

где: H — срок службы в часах, I — ионный ток в амперах (при определенном напряжении между анодом и катодом), β — коэффициент, зависящий от рода оставшегося газа (распыление), b — коэффициент, зависящий от температуры средней части нити (испарение), B — коэффициент запаса атомов тория (запас).

Значение B — от 250 до 350 (число мономолекулярных слоев).

Значение β для неона — $3,0 \times 10^{11}$; для аргона — $4,4 \times 10^{11}$; для водорода — $1,3 \times 10^8$; при скорости ионов, равной 50 вольтам.

Значение b — функции температуры; для

$$\begin{aligned} 2000^\circ \text{K} & \quad b = 19,56 \\ 2100^\circ \text{K} & \quad b = 223,8; \end{aligned}$$

промежуточные значения легко определяются по скорости испарения.

Ошибка в определении коэффициента B не так велика, и она сравнительно мало скажется на сроке службы. Коэффициент b определяется достаточно точно по температуре. Определение же коэффициента β встречает существенные затруднения. Но в тех случаях когда значение тока $I < 10^{-12}$ ампера, со всей величиной βI можно не считаться. Если же ионный ток имеет большое значение, можно по некоторым косвенным признакам дополнительных определений, на которых мы сейчас останавливаться не будем, судить о роде газа и сделать более или менее правильный выбор коэффициента β .

РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТИ АНОДА И СТЕКЛЯННОГО БАЛЛОНА ВЫПРЯМИТЕЛЯ.

1. Допустимая нагрузка на анод для различных материалов.

Потери в кенотроне состоят из потерь, идущих на подогрев катода, равных произведению тока накала на напряжение накала: $P_1 = IV$, и из потерь в анодной цепи, равных произведению анодного тока на падение напряжения внутри кенотрона: $P_2 = I_a V$. Первые потери постоянны и не зависят от нагрузки, вторые потери зависят от нее. Потери анодной цепи выделяются целиком на аноде. Кроме того мощность, идущая на подогрев катода, для большинства конструкций электродов кенотрона, выделившись сначала на катоде, излучается в результате последним и выделяется на аноде, а частью и на прочей арматуре и на стенках колбы выпрямителя.

Таким образом обычно приходится принимать за нагрузку анода всю мощность, выделившуюся в кенотроне в виде потерь. Очевидно, что анод в свою очередь всю получаемую мощность должен излучить куда-то дальше. Так как анод должен излучать при гораздо меньшей температуре своей поверхности, сама поверхность должна быть значительно больше. Анод не может работать при высокой температуре по следующим причинам: 1) возможность образования обратного тока, 2) усиленное испарение материала анода, приготовляемого из более дешевого материала чем катод (никель, молибден, медь в лампах, охлаждаемых водой, феррохром и др.).

Обычно в технике пустотных приборов употребляется никель, как более дешевый материал. Нагрузка на никель в кенотроне дается обычно от 1,0 до 2,0 W на 1 см² поверхности. Но хорошо обезгаженный и прокаленный в вакууме никель может выдержать значительно большую нагрузку, доходящую до 4 W на 1 см². Важно также иметь правильную конструкцию анода, при которой обеспечивалось бы равномерное распределение выделяющейся мощности по всей поверхности (или вернее получалась в результате нагрева равномерная температура). Молибденовые аноды могут работать при значительно более высокой температуре (темнокрасное, или даже переходящее в светлое каление) и могут рассеивать до 4—6 W на 1 см².

Тантал исключительно благоприятный материал для анода, так как допускает высокую температуру и нагрузку порядка 5 W на см². Тантал кроме того содержит очень мало абсорбированных газов и не дает почернения баллонов, так как слабо испаряется. Употребляется только в исключительно ответственных случаях, так как он очень дорог.

Аноды, охлаждаемые водой, делаются обычно из меди и допускают нагрузку до 15—20 W на 1 см² поверхности. Феррохромовые аноды (73% железа, 25% хрома и 2% примесей) допускают несколько большую нагрузку, чище и дают меньше абсорбированных газов сравнительно с медными, но изготовление такого сплава значительно дороже, так как часто получается брак материала (пористость, коробление после нагревания и в результате отставание или трескание в месте сварки со стеклом).

Для увеличения излучающей способности анода поверхность последнего подвергается различной обработке (защернение, травление и др.), либо аноду придается волнистая или иная форма, увеличивающая его излучающую поверхность. Подробно на этих вопросах останавливаться не будем.

2. Допускаемая нагрузка на стекло и расчет размеров баллона выпрямителя.

Очевидно, что вся мощность, выделяемая в кенотроне, будет выделена в конце концов на поверхности всей трубки. Так как трубка имеет возможно более высокий вакуум, мощность, рассеиваемая анодом, выделится на части баллона непосредственно против последнего. Обычно для стекла принимают допустимую мощность в $1/4 \text{ W}$ на 1 см^2 . Но в некоторых случаях эта мощность может быть значительно поднята и доходит до 1 W на 1 см^2 . Для примера можно показать, что если имеется никелевый цилиндрический анод с нагрузкой 1 W/см^2 , то диаметр цилиндрического стеклянного баллона очевидно должен быть в $\left(\frac{1,00}{0,25} = 4\right)$ четыре раза больше диаметра анода, если рассеяние для стекла принято в $0,25 \text{ W}$ на см^2 поверхности стекла.

РАЗЛИЧНЫЕ ВОПРОСЫ, СВЯЗАННЫЕ С ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

НАРУШЕНИЯ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ РАБОТОЙ МОЩНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ В ЛИНИЯХ СВЯЗИ И БОРЬБА С НИМИ.

Мощные ртутные выпрямители в установках, служащих для питания электрических дорог, в некоторых случаях являются причиной нарушения телефонной связи в линиях, расположенных вблизи линий передачи. Это нарушение состоит главным образом в появлении шума и высокого тона в телефоне, при этом сила этого нарушающего тона может быть столь велика, что делается невозможной самая связь. Причиной этих нарушений являются пульсации, имеющие место вследствие недостаточного сглаживания выпрямленного тока. Так как большинство выпрямительных установок работает по шестифазной схеме, то в качестве низшего тона мы будем иметь для такого рода установки тон, отвечающий 6-й гармонике, т. е. для 50-периодного тока мы будем иметь 300 периодов; далее будет иметь место хотя и в более ослабленном виде 9-я гармоника, 12-я, т. е. 600, 900 и 1200 периодов.

Хотя из геометрических соотношений можно ожидать 6-ю гармонику в выпрямленном напряжении всего лишь в виде $5,7\%$, однако в действительности эта и выше гармоника имеют место в большем размере, приведенном в таблице 62.

Таблица 62.

Частота гармоник	Амплитуда напряжения гармоник в % от V_g	Частота гармоник	Амплитуда напряжения гармоник в % от V_g
300	6 — 8	900	1 — 1,5
600	3 — 4	1200	0,5 — 1

Это увеличение объясняется несинусоидальностью напряжения, вызванной железом и зажигательным потенциалом дуги.

Воздействие линии передачи на линию связи состоит почти исключительно в магнитной индукции. Электростатическая связь играет, как показывает опыт, весьма малую роль.

Для устранения указанного вредного влияния пульсаций выпрямленного тока можно идти двумя путями: первый путь заключается в том, что улучшением изоляции линий связи, устройством достаточного количества перекрещиваний возможно в значительной степени, достаточной для практических целей, устранить вредное влияние. Другой способ заключается в улучшении качества выпрямленного тока, идущего по линии передачи, в смысле уменьшения пере-

менной составляющей этого тока. Сглаживание переменной составляющей выпрямленного тока, хотя и имеет место уже и без всяких специальных устройств вследствие индуктивности двигателей электровозов, однако для устранения вредного влияния этого недостаточно. Уменьшая переменную составляющую, нужно, как показывает опыт, довести ее до $\frac{1}{10}$ или даже $\frac{1}{20}$ первоначальной величины.

Такого рода сглаживание возможно осуществлять лишь путем устройства фильтров или отсасывающих резонансных контуров. Сглаживание без помощи конденсаторов, не резонансным путем, пользуясь одними лишь реактивными катушками в катод, не дает благоприятного решения задачи. В качестве фильтра применяется, обычно, следующего рода устройство: последовательно в цепи выпрямленного тока включается реактивная катушка, служащая для создания индуктивного сопротивления. За реактивной катушкой между полюсами выпрямленного тока включается ряд резонансных цепей, состоящих каждая из конденсатора и надлежащим образом подстроенной реактивной катушки. Число таких цепей может ограничиться при шестифазном выпрямлении тремя или четырьмя, настроенными на частоту 300, 600, 900 и 1200 периодов. В качестве реактивной катушки

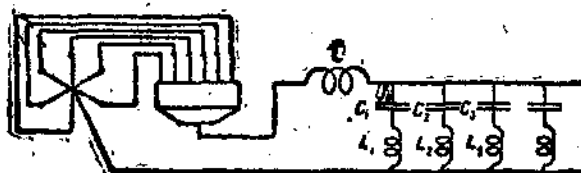


Рис. 308. Схема фирмы AEG включения фильтров для устранения мешающих влияний на линии связи.

могут быть взяты как реактивные катушки с железным сердечником, так и воздушные; при этом надо обратить внимание на то, что реактивные катушки, включенные в цепь выпрямленного тока, должны быть рассчитаны на постоянную составляющую выпрямленного тока, тогда как реактивные катушки, включенные в резонансные цепи, этой постоянной составляющей не имеют.

Некоторые фирмы, например AEG, для увеличения индуктивности реактивной катушки L (рис. 308) включают параллельно ей конденсатор.

Самый расчет резонансных цепей может идти следующим путем: пусть пульсации напряжения, отвечающие 6-й гармонике, будут равны 8% . Требование, предъявляемое к сглаженному напряжению, пусть составляет 10-кратное уменьшение напряжения 6-й гармоники. Если выпрямленное напряжение составляет 2000 вольт, то 6-я гармоника должна быть уменьшена с 160 вольт до 16 вольт, откуда следует, что сопротивление реактивной катушки L должно быть равным:

$$\omega_6 L = \frac{V_g (1 - 0,1) 0,08}{I_6} \approx \frac{V_g 0,08}{I_6} = \frac{160}{I_6}; \quad (311)$$

обозначим величину оставшихся пульсаций 6-й гармоники через V_6' и, задаваясь величиной L , можем найти ток 6-й гармоники, который должен пройти через резонансные цепи. Для него мы имеем:

$$I_6 = \frac{160}{\omega_6 L} = \frac{160}{300 L} \quad (312)$$

Кроме того для тока I_6 имеем:

$$I_6 = \frac{V_6'}{Z}, \quad (313)$$

где:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Так как цепь, состоящая из емкости C_1 и индуктивности L_1 , настроена на частоту 300 периодов, то $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ и для тока I_0 получим

$$I_0 = \frac{V_0'}{R}; \quad (314)$$

из уравнений (312) и (314) мы можем определить величину ваттного сопротивления резонансной цепи

$$R = \frac{300 V_0' L}{160} \quad (315)$$

первого звена. Напряжение 6-й гармоники на конденсаторе резонансной цепи получим из уравнения: $V_c = \frac{1}{\omega C} I_0$, задаваясь величиной C . Если мы в качестве конденсатора выберем конденсатор с бумажной изоляцией или типа турбонит, то для этих конденсаторов мы имеем в качестве косинуса потерь 0,5%, откуда найдем сопротивление, вносимое конденсатором, помощью следующего выражения: $R_c = \frac{V_c}{I_0} 0,005$. Так как уравнение (315) даст нам общее ваттное сопротивление резонансной цепи в виде R , то для ваттного сопротивления реактивной катушки R_L мы получим:

$$R_L = R - R_c.$$

В том случае, если полученное таким образом сопротивление не может быть конструктивно осуществлено, то можно уменьшить величину индуктивности L_1 за счет увеличения емкости конденсатора C_1 , и таким образом получить приемлемое сопротивление R_L . Если однако этот путь приведет к большим kVA, а значит и большей стоимости конденсаторов C_1 , то приходится, задаваясь элементами резонансной цепи, т. е. величинами L_1 и C_1 , определить величину сопротивления R , которая из уравнения (314) даст ток I_0 , и по этому току из уравнения (312) определить величину индуктивности L . Так же точно определяются величины и для следующих резонансных цепей.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕНТИЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ.

Кроме использования выпрямлений в силовых установках они находят ряд применений, расширяющихся с каждым годом, для целей измерения. В этом случае, конечно, токи, проходящие через вентили, могут быть весьма малыми, поэтому требования высокой отдачи, столь важные в силовых установках, не играют здесь роли. Наиболее существенным вопросом здесь будет устойчивость работы вентилей и простота его конструкции. Возможность выпрямления измеряемого тока допускает замену приборов переменного тока, обладающих, как известно, рядом недостатков, приборами типа Демра. В этом случае градуировка прибора может быть произведена постоянным током, что значительно удобнее, так как возможно при этом пользоваться нормальным элементом и нормальным сопротивлением. Особенно большой интерес представляет замена

приборов переменного тока выпрямителем и прибором типа Депрэ, в случае измерения весьма малых токов, в виду отсутствия удобных в обращении приборов этого рода чисто переменного тока.

1. Термопара как выпрямитель.

Наиболее простым прибором для выпрямления слабых токов может служить термопара, горячий спай которой нагревается измеряемым переменным, током причем на спай включается прибор постоянного тока, обычно типа Депрэ. Термопара в этом случае имеет форму креста, образованного двумя разнородными проволоками, например, из константана и серебра. Такого рода термопара может быть расположена в воздухе или же заключена в баллон, из которого выкачан воздух. В последнем случае чувствительность прибора весьма сильно повышается. Изготавливаемые, например, фирмой Кембридж такого рода термопары при пропускании тока в 5 миллиампер развивают термоэлектрическое напряжение около 6 милливольт, почему с гальванометром на 6 милливольт могут с успехом служить для измерения переменных токов, начиная от одного миллиампера.

В случае применения зеркальных гальванометров предел измерения может быть в значительной степени расширен, сопротивление термопары составляет всего только около 1 ома; иначе говоря, прибор требует весьма мало энергии. Большое преимущество прибора представляет то, что такая система пригодна для измерения как постоянных токов, так и переменных, включая и токи высокой частоты. Шкала в данном случае получается квадратичной, почему точность измерений весьма сильно возрастает при приближении к верхнему пределу. В данном случае переменный ток проходит непосредственно по термопаре, что представляет в некоторых случаях неудобства, приводящие часто к невозможности вести градуировку на постоянном токе. Значительно сложнее система, требующая к тому же больше энергии и обладающая меньшей чувствительностью, в которой подогрев термопары производится специальной проволокой, по которой проходит нагревающий ее переменный ток и передача тепла к спаю термопары происходит лучистой энергией; такого рода приборы изготавлиются, например, фирмой Вестон; они могут быть изготовлены на силы тока до 750 ампер, и находят применение до частоты 3000 периодов. Для больших частот фирма Вестон изготавливает приборы несколько измененной конструкции, дающие показания с точностью до 1%, до частот миллион периодов. Наиболее чувствительным термогальванометром является термогальванометр Дуддэля. Здесь термоэлемент состоит из пары висмут — сурьма, которые вместе с тем и образуют один виток чувствительного гальванометра; этот виток, находящийся в постоянном магнитном поле, получает нагревание в точке спаивания, излучаемым нагреваемой проволокой из платины или платинированной полоски слюды. Такого рода гальванометр дает полное отклонение при 5 миллиамперах, расходуя не более 0,004 ватта, при сопротивлении в 150 ом. Шкала такого прибора чисто квадратичная.

2. Сухие выпрямители.

В качестве выпрямителя для питания измерительных приборов, особенно при высоких частотах, широко применялся до сих пор контактный детектор. Однако такого рода детектор отличается малым постоянством, почему не всегда может быть с успехом применяем; гораздо более удобным и постоянным надо считать выпрямитель, описанный нами ранее в главе V, ч. II, так называемый сухой пластинчатый выпрямитель. Он дает достаточное постоянство и в виду

простоты устройства находит все большее и большее применение; не только непосредственно для измерительных приборов, но и для питания различного рода реле. Такого рода измерительные приборы с сухим выпрямителем изготовляет фирма Сименс и Гальске.

3. Электронные выпрямители.

Большое распространение последнее время получают приборы, использующие вентили с накаливаемым катодом; этого рода приборы служат в соединении с вольтметром постоянного тока для измерения высокочастотных токов и напряжений; в качестве вентилей здесь обычно применяется триод. Он кроме выпрямления служит также усилителем. На рис. 309 дана схема включения для такого рода измерений. Для измерений максимальных значений напряжения помощью вентилей могут быть применены схемы, показанные на рис. 310. Здесь конденсатор *C* заряжается вентилем до тех пор, пока не получит напряжения, отвечающего наибольшему значению пульсирующего напряжения. Для измерения пульсаций постоянного тока применяется схема рис. 311. Конденсатор *B* заряжается вентилем до максимальной величины напряжения. Когда напряжение упадет до минимальной величины, конденсатор *B* разряжается через конденсатор *A* и

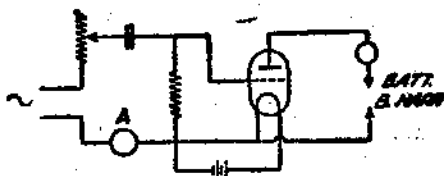


Рис. 309. Схема включения для измерения силы высокочастотных токов с помощью амперметра постоянного тока и электронного выпрямителя.

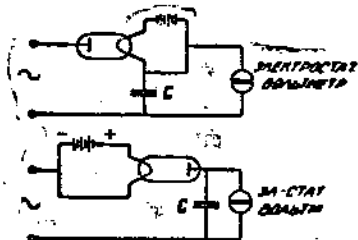


Рис. 310. Схемы включения для измерения максимальных значений напряжения с помощью электростатического вольтметра и электронного вентилей.

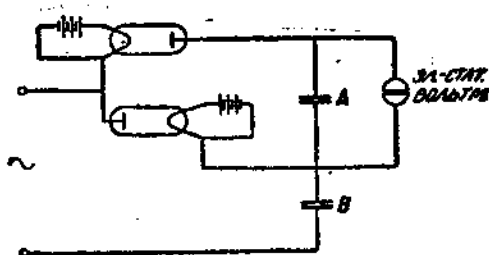


Рис. 311. Схема включения для измерения пульсаций постоянного тока с помощью электростатического вольтметра и электронных вентилей.

соответствующий вентиль, причем конденсатор *A* заряжается до наименьшего значения напряжения. Таким образом электростатический вольтметр даст переменную составляющую напряжения.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ, СЛУЖАЩИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ В ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ.

Как было указано ранее, форма кривых токов и напряжений, имеющих место в выпрямительных устройствах как в анодных цепях, так и в цепях катода, весьма сильно отличаются от синусоиды. В большинстве случаев здесь

кроме переменных составляющих имеют место также и постоянные составляющие, в тех или других отношениях между собой. Так как большинство измерительных приборов назначены для измерения либо постоянных токов, либо синусоидальных переменных токов, то при измерениях в выпрямительных схемах необходимо обращать внимание на систему измерительного прибора, который желают применить в том или другом случае. Для измерения постоянной составляющей напряжения V_a или тока I_a необходимо пользоваться исключительно прибором типа Депрэ; этот прибор дает среднюю арифметическую тока или напряжения. Для измерения эффективных значений анодных токов или выпрямленного тока лучше всего пользоваться электродинамическим или тепловым прибором; приборы с мягким железом дадут здесь ошибку. Так как, однако, в выпрямленных токах среднее арифметическое и эффективное значения, как это видно из уравнений (165) и (166), имеют малое отличие друг от друга, то применение приборов с мягким железом для измерения выпрямленных токов и напряжений даст небольшие погрешности. Для измерения переменных составляющих токов возможно пользоваться либо трансформатором, либо находить эти значения, исходя из измерений, полученных прибором типа Депрэ и тепловым или электродинамическим прибором. В первом случае необходимо обратить внимание на постоянную составляющую тока, которая может насытить сердечник трансформатора.

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ВЫПРЯМИТЕЛЯМ.

(Составлен библиотекой центральной радио-лаборатории).

I. Общие вопросы	№№ 1—39
II. Физические основы	№№ 31—89
III. Соотношения между электрическими величинами и схемы	№№ 100—113
IV. Механические выпрямители	№№ 114—143
V. Электролитические выпрямители	№№ 144—195
VI. Сухие выпрямители и детекторы	№№ 196—392
VII. Выпрямители с накаливаемым катодом	№№ 303—364
VIII. Газовые выпрямители с тлеющим разрядом	№№ 365—383
IX. Ртутные выпрямители	№№ 384—566
X. Выпрямительные установки	№№ 567—682

I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ.

1. Güntherschulze A. Elektrische Ventile. Handwörterbuch der Naturwissenschaften. 1911.
2. Riemenschneider K. und E. Welter. Elektrische Umformer und Gleichrichter. Wien and Leipzig, A. Hartlebens Verlag, 1915.
3. Güntherschulze A. Übersicht über den heutigen Stand der Gleichrichter. Helios, Bd. 26, 1920, 125.
4. Steinmetz Ch. Prot. Theory and calculation of transient electric phenomena and oscillations. 3d ed., New-York, McGraw Hill Book Co., 1920.
5. Prince D. C. Mathematical treatment of rectification phenomena. Proc. I. R. E., vol. 10, 1922, 393.
6. Güntherschulze A. Elektrische Gleichrichter und Ventile. München, J. Kösel und F. Pustet, Verlagsabt. Kempten, 1924.
7. Güntherschulze A. und W. Germershausen. Übersicht über den heutigen Stand der Gleichrichter. 2 Aufl. Leipzig, Hachmeister & Thal, 1925. (Sonderabdr. aus Helios, Bd. 31, 1925. №№ 1—6.)
8. Holler H. D. and J. P. Schrodtt. Theory and performance of rectifiers. Techn. Pap. Bur. of Stand., vol. 18, N. 265, 1924/25, 465—527. Ref.: ETZ, Bd. 47, 1926, 1299.
9. Colebrook F. The rectification of small radio frequency potential differences. E. W. & W. E., vol. 2, 1925, 628.
10. Colebrook F. The rectification of small radio frequency potential differences by means of triode valves. Parts 1, 2, 3, 4. E. W. & W. E., vol. 2, 1925, N. 26, 865; N. 27, 946; vol. 3, 1926, N. 28, 34; N. 29, 90.
11. Mines R. Rectifiers for high tension supply. Parts 1, 2, 3, 4, 5, 6. E. W. & W. E., vol. 2, 1925, N. 23, 687; N. 24, 780; N. 25, 844; N. 26, 897; N. 27, 982; vol. 3, 1926, N. 28, 41; N. 29, 105.
12. Güntherschulze A. Electric rectifiers and valves. Transl. by N. A. de Bruyne. London, Chapman & Hall, 1927.
13. Güntherschulze A. Elektrische Ventile, Gleichrichter, Verstärkerröhren, Relais. Handbuch der Physik. Hersg. v. H. Geiger und K. Scheel. Berlin, J. Springer, 1927, Bd. 16, 121.
14. Handbuch der Physik. Hersg. v. H. Geiger und K. Scheel. Berlin, J. Springer, 1927, Bd. 14 (Elektrizitätsbewegung in Gasen).
15. Handbuch der Radiologie. Hersg. v. E. Marx. Leipzig, Akad. Verlagsges., 1927, Bd. 4, Teil 3 (2 Aufl.).
16. Seeliger R. Einführung in die Physik der Gasentladungen. Halle, J. A. Barth, 1927.
17. Вологдин В. Выпрямители в радиотехнике. Техн. энцикл. М., „Сов. энцикл.“, 1928, т. 4, стр. 677—693.

18. Фортескью Ч. Трансформаторы и выпрямители. Перевод под ред. Ф. И. Ходякова. Ф. Фауль. Справочн. по электротехн. М., Мосиздат, 1928, вып. 2, стр. 194—204.
19. Семенов Н. Электронные явления. Под ред. акад. А. Ф. Иоффе. Лг., Научно-техн. изд-во, 1928.
20. Шапошников А. Современные вопросы в технике радиоламп. Т. и Т. б. п., т. 9, № 47, 1928, стр. 202—219.
21. Handbuch der Experimentalphysik. Hersg. v. W. Wien und F. Harms. Leipzig, Akad. Verlagsges., 1928, Bd. 13, 2 Teil. (Physik der Glühelktroden von W. Schottky und H. Rothe. Herstellung der Glühelktroden von H. Simon. Technische Elektronenröhren und ihre Verwendung von H. Rothe.)
22. Nießhammer F. Fortschritte und Neuerungen im Bau elektrischer Maschinen, Apparate und Anlagen. E. u. M., Bd. 46, N. 1, 1928, I.
23. Jolley L. B. Alternating current rectification and allied problems. London, Chapman & Hall, 2d ed. 1926; 3d ed. 1928.
24. Thomson J. and G. Thomson. Conduction of electricity through gases. 3d ed. Cambridge, University Press, 1928, vol. 1.
25. Брагин А., А. Вальтер и Н. Семенов. Теория и практика пробоя диэлектриков. М., ГИЗ, 1929.
26. Ситников М. Ионные процессы и некоторое их техническое использование. М., Научно-техн. управлен., ВСНХ, 1929.
27. Спяня Л. Электронная лампа как детектор. М., НКПТ, 1929.
28. Güntherschulze A. Elektrische Gleichrichter und Ventile. 2 Aufl. Berlin, J. Springer, 1929.
29. Handbuch der Experimentalphysik. Hersg. v. W. Wien und F. Harms, Leipzig, AVG, 1929, Bd. 13, 3. Teil. (Allgemeine Eigenschaften der selbständigen Entladungen. Die Bogenentladung. — R. Seelliger. Townsendentladungen. Die Glühmentladung. — G. Mierdel).
30. Soulier A. Les redresseurs de courants alternatifs. Bull. Soc. Franç., vol. 9, N. 92, 1929, 381.

II. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.

31. Jentsch F. Über die Elektronenemission glühender Metalloxyde. Ann. d. Phys., Bd. 27, N. 11, 1908, 129.
32. Papalex N. Über die Vorgänge in einem Wechselstromkreis mit elektrischem Ventil. Ann. n. Phys., Bd. 39, N. 15, 1912, 976.
33. Langmuir I. Thermionenströme im hohen Vakuum. Phys. Z., Bd. 15, 1914, N. 7, 348; N. 10, 516.
34. Ионный вентиль. По В. Икз'у. (The Year Book of Wireless Telegr. and Teleph. 1917). Радиотехник, т. 2, № 7, 1919, стр. 136—159.
35. Nielsen H. Über die Kurvenform des Stromes und der Spannungen an Quecksilberdampf-Gleichrichtern für Einphasen-Wechselstrom. ETZ, Bd. 40, № 20, 1919, 224.
36. Greinacher H. Erzeugung einer Gleichspannung vom vielfachen Betrage einer Wechselspannung ohne Transformator. Bull. Schweiz. Elektrot. Ver., 1920.
37. Hebb T. C. Arcing voltages in mercury vapor as a function of the temperature of the cathode. Phys. Rev. (2), vol. 16, N. 5, 1920, 375.
38. Güntherschulze A. Beiträge zur elektrolytischen Ventilwirkung. II. Die Polarisationkapazität des Tantals. Z. f. Phys., Bd. 6, 1921, 237.
39. Fry T. C. The thermionic current between parallel plane electrodes, velocities of emission distributed according to Maxwell's law. Phys. Rev. (2), vol. 17, N. 4, 1921, 441.
40. Güntherschulze A. Beiträge zur elektrolytischen Ventilwirkung. III. Der Zusammenhang zwischen Maximalspannung und Ionenkonzentration des Elektrolyten bei Aluminium. Z. f. Phys., Bd. 9, 1922, 197.
41. Güntherschulze A. Die Vorgänge an der Kathode des Quecksilbervakuumlichtbogens. Z. f. Phys., Bd. 11, 1922, 74.
42. Güntherschulze A. Dissoziation, Temperatur und Dampfdruck im Quecksilberlichtbogen. Z. f. Phys., Bd. 11, 260.
43. Joos G. Über den Stromverlauf in einem Wechselstromkreis mit Selbstinduktion und elektrischem Ventil von beliebiger Charakteristik. Jahrb. d. d. T. u. T., Bd. 19, N. 2, 1922, 109.
44. Joos G. Über die Rückwirkung eines in den Sekundärkreis eines Transformators eingeschalteten elektrischen Ventils auf den Primärkreis. Jahrb. d. d. T. u. T., Bd. 19, N. 4, 1922, 276.
45. Белявский А. Косвенный метод измерения очень малых упругостей газов. Т. и Т. б. п., т. 4, № 20, 1923, стр. 283—285.

46. Güntherschulze A. Die Anode des Quecksilberlichtbogens. Z. f. Phys., Bd. 13, 1923, 378.
47. Schottky W. Über kalte und warme Elektronenentladungen. Z. f. Phys., Bd. 14, 1923, 63.
48. Güntherschulze A. Kathodenfall und Glühstromstärke im Quecksilberdampf-Gleichrichter. Z. f. Phys., Bd. 15, 1923, 244.
49. Güntherschulze A. Der Lichtbogen in Gemischen von Quecksilberdampf und anderen Gasen. Z. f. Phys., Bd. 15, 1923, 254.
50. Güntherschulze A. Die Energieverteilung an der Kathode der Glühmentladung. Z. f. Phys., Bd. 15, 1923, 8. Nachtrag. Bd. 23, 1924, 334.
51. Güntherschulze A. Die Stromdichte des normalen Kathodenfalles. Z. f. Phys., Bd. 19, 1923, 313.
52. Güntherschulze A. Die Gesetze der Glühmentladung. Z. f. Phys., Bd. 20, 1923, 1.
53. Güntherschulze A. Kathodenfall, Ionisierungsspannung und Atomgewicht. Z. f. Phys., Bd. 20, 1923, 153.
54. Joffe A. Elektrizitätsdurchgang durch Kristalle. Ann. d. Phys., Bd. 72, N. 22, 1923, 461.
55. Dushman S. and J. Ewald. Graphs for calculation of electron emission from tungsten, thoriated tungsten, molybdenum and tantalum. G. E. R., vol. 28, N. 3, 1923, 154.
56. Langmuir I. and K. B. Blodgett. Currents limited by space charge between coaxial cylinders. Phys. Rev. (2), vol. 22, N. 4, 1923, 347.
57. Langmuir I. Positive ion currents in the positive column of the mercury arc. G. E. R., vol. 26, N. 11, 1923, 731. Ref.: E. u. M., 1924, 172.
58. Белявский А. Увеличение предела измерения вакуума с помощью манометра Мак-Леода. Т. и Т. 6. н., т. 5, № 26, 1924, стр. 356—357.
59. Güntherschulze A. Normaler Kathodenfall der Glühmentladung und Ablösarbeit der Elektronen. Z. f. Phys., Bd. 24, 1924, 52.
60. Richardson O. W. Electron emission from metals as a function of temperature. Phys. Rev. (2), vol. 23, N. 2, 1924, 153.
61. Prince D. C. Rectifier wave forms. G. E. R., vol. 27, N. 9, 1924, 608.
62. Issendorf J. v. Energetik der Wandströme in Quecksilberdampfentladungen. Wiss. Veröff. a. d. Siemens Konzern, Bd. 4, 1925, 124.
63. Güntherschulze A. Kathodenfall, Stromstärke und Fallraumdicke der Glühmentladung in Gemischen von Gasen, die chemisch nicht miteinander reagieren. Z. f. Phys., Bd. 28, 1925, 129.
64. Güntherschulze A. Über ein Pseudohochvakuum. Z. f. Phys., Bd. 31, 1925, 606.
65. Güntherschulze A. Versuch einer Theorie der Erscheinungen an der Kathode der Glühmentladung. Z. f. Phys., Bd. 33, 1925, 810.
66. Güntherschulze A. Der normale Kathodenfall in Krypton und Xenon. Z. f. Phys., Bd. 34, 1925, 549.
67. Güntherschulze A. Elektroneubahnen. Z. f. Phys., Bd. 34, 1925, 639.
68. Cockroft J. D., R. T. Coe, J. A. Tyacke and Miles Walker. An electric harmonic analyser. Journ. I. E. E., vol. 63, N. 337, 1925, 69.
69. Jolley L. B. Wave-form analysis on rectified circuits. Journ. I. E. E., vol. 63, N. 342, 1925, 588.
70. James A. C. The rectification of alternating current by crystals. Phil. Mag. (6), vol. 49, N. 292, 1925, 681.
71. Garratt G. Short-path discharge rectifiers. E. W. & W. E., vol. 2, N. 20, 1925, 471.
72. Ippisch K. Die Leistungspolarität bei Ventilleffekten. Phys. Z., Bd. 27, N. 7, 1926, 199.
73. Güntherschulze A. Die Energieverteilung zwischen Anode und Kathode der Glühmentladung. Z. f. Phys., Bd. 37, 1926, 868.
74. Güntherschulze A. Über den Einfluss geringer Zusätze von Alkali oder Erdalkali zu Quecksilber auf den normalen Kathodenfall. Z. f. Phys., Bd. 39, 1926, 491.
75. Seeliger R. Bemerkung zur Theorie des Kathodendunkelraumes. Z. f. Phys., Bd. 39, 1926, 601.
76. Güntherschulze A. Über einen neuen Effekt der anomalen Glühmentladung und seine Beziehung zum Pseudohochvakuum. Z. f. Phys., Bd. 40, 1926, 414.
77. Güntherschulze A. Zur Theorie des Kathodendunkelraumes. (Zu einer gleichlautenden Bemerkung von R. Seeliger.) Z. f. Phys., Bd. 40, 1926, 545. Erwiderung: R. Seeliger. Bd. 41, 1927, 535.
78. Güntherschulze A. Die Ventilwirkung des Silbers in wässrigen Lösungen von Kaliumthiocyanid. Z. f. Phys., Bd. 40, 1927, 876.
79. Goetz A. Untersuchungen über die glühlektrische Emission von Metallen bei Zustandsänderungen des Kathodenmaterials. I. u. 2. Mitt. Z. f. Phys., 1927, Bd. 42, 329; Bd. 43, 531.

80. Geiger W. Messung der Wechselstromkomponente von Gleichrichterströmen nach der Kompensationsmethode. Arch. El., Bd. 18, N. 6, 1927, 641. Ref.: ETZ, Bd. 48, N. 49, 1927, 1811.

81. Beetz W. Beitrag zur Messung der Energie im Anodenstromkreis von Quecksilberdampfgleichrichtern. E. u. M., Bd. 45, N. 45, 1927, 921.

82. Skaupy F. Der elektrische Lichtbogen zwischen Wolframelektroden und seine technische Anwendung. ETZ, Bd. 48, N. 49, 1927, 1797. Bespr.: 1821.

83. Groeneveld J., Balsh. v. d. Pol und K. Posthumus. Gittergleichrichtung. Jahrb. d. T. u. T., Bd. 29, N. 5, 1927, 139. Ref.: E. u. M., N. 50, 1927, Radiotechnik, N. 14.

84. Schleede A. und H. Buggisch. Zur Frage der Richtung des „gleichgerichteten“ Stromes beim Kristalldetektor. Phys. Z., Bd. 28, N. 4, 1927, 174.

85. Seeltger R. u. H. Schmick. Studien über den Mechanismus des Lichtbogens. Phys. Z., Bd. 28, N. 17, 1927, 605.

86. Lübcke E. Über die Beeinflussung von Wandströmen in Quecksilberdampfentladungen. Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern, Bd. 5, 1927, 182.

87. Compton K. T. The electric arc. Trans. A. I. E. E., vol. 46, 1927, 868.

88. Compton K. T. The electric arc. (Abridgement). Journ. A. I. E. E., vol. 46, N. 11, 1927, 1192.

89. Compton K. T. and C. C. Van Voorhis. Heats of condensation of positive ions and the mechanism of the mercury arc. Proc. Nat. Ac. Sci., vol. 13, N. 5, 1927, 336.

90. Кобеко П. и И. Курчагов. Ионная и смешанная проводимость твердых тел. Усп. физ. наук, т. 8, № 3, 1928, стр. 361—393.

91. Güntherschulze A. Zusammenhang zwischen Stromdichte und Kathodenfall der Glimmentladung bei Verwendung einer Schutzringkathode und Korrektur der Temperaturerhöhung des Gases. Z. f. Phys., Bd. 49, 1928, 358.

92. Güntherschulze A. Die Abhängigkeit des normalen Kathodenfalles der Glimmentladung von der Gasdichte. Z. f. Phys., Bd. 49, 1928, 473.

93. Кобеко П., И. Курчагов и К. Синельников. Механизмы выпрямления некоторых солей. Журн. Р. Ф.-Х. О., Ч. физ., т. 61, № 5, 1929, стр. 459—475.

94. Shaw A. E. Cold cathode rectification. Proc. I. R. E., vol. 17, № 5, 1929, 849.

95. Kirschstein B. Über Anregung von Quecksilber durch Stoss langsamer Natriumionen. Z. f. Phys., Bd. 60, 1930, 184.

96. Güntherschulze A. Die behinderte Glimmentladung. Z. f. Phys., Bd. 61, 1930, N. 1—2, 1; N. 9—10, 581.

97. Steenbeck M. Über die Trägerbildung durch positive Ionen in der Glimmentladung. Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern, Bd. 8, 1930, 83.

98. Steenbeck M. Ein Versuch über den Mechanismus der Elektronenbefreiung an der Kathode einer Glimmentladung. Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern, Bd. 8, 1930, 94.

99. Compton K. T. and I. Langmuir. Electrical discharges in gases. Part I—Survey of fundamental processes. Review of Modern Phys., vol. 2, N. 2, 1930, 123—242.

III. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ И СХЕМЫ.

100. Steinmetz Ch. Der Einfluss der Selbstinduktion auf pulsierende Ströme. ETZ, Bd. 11, N. 36, 1890, 481.

101. Greinacher H. Über einen Gleichrichter zur Erzeugung konstanter Gleichspannungen. Verh. D. Phys. Ges., Bd. 16, 1914, 320.

102. Hull A. W. The production of constant high potential with moderate power capacity. G. E. R., vol. 19, N. 3, 1916, 173.

103. Schenkel M. Eine neue Schaltung für die Erzeugung hoher Gleichspannungen. ETZ, Bd. 40, N. 28, 1919, 333.

104. Searing H. and M. Redmond. Poltphase rectification. Proc. I. R. E., vol. 10, N. 1, 1922, 52.

105. Kade H. Die Änderung des Leistungsfaktors auf dem Wege vom Generator zum Gleichrichter. Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern, Bd. 3, 1923, 41. Ref.: ETZ, Bd. 45, N. 12, 1924, 248.

106. Jaeger W. und H. von Steinwehr. Kondensator im Wechselstromkreis mit Ventil. Arch. f. El., Bd. 13, N. 4, 1924, 330.

107. Brenzinger M., F. Dessauer u. E. Lorenz. Ein Instrumentarium zur Erzeugung von nochgespanntem Gleichstrom. Z. techn. Phys., Bd. 7, N. 2, 1926, 84. Ref.: ETZ, Bd. 49, N. 11, 1928, 443.

108. Müller C. Zur Erzeugung hoher Gleichstromspannungen. Z. techn. Phys., Bd. 7, 1926, 148. Ref.: ETZ, Bd. 49, N. 11, 1928, 443.

109. Brenzinger M. Vergleichende Betrachtungen über Ventil-Kondensator-Schaltungen zur Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom. Arch. El., Bd. 18, N. 4, 1927, 354. Ref.: ETZ, Bd. 48, N. 45, 1927, 1668.
110. Marx E. Die Erzeugung sehr hoher Gleichspannungen. ETZ, Bd. 49, N. 6, 1928, 199.
111. Müller E. Zur Frage der Definition des Leistungsfaktors. ETZ, Bd. 49, N. 7, 1928, 251. Brief: 633; Brief v. E. Kern: 1167; Erwid. v. K. E. Müller: 1168.
112. Hermanspann P. Hochfrequenz-Gleichrichter-Anlage mit automatischer Konstanthaltung der Gleichspannung. Jahrb. d. d. T. u. T., Bd. 33, N. 4, 1929, 121.
113. Demontvignier M. Contribution à l'étude du filtrage des courants redressés. Bull. Soc. Franç. Electr. (4), vol. 9, N. 97, 1929, 982.

IV. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ.

114. Falkenthal E. Ein neuer Wechselstromerzeuger für Fernsprechzwecke. ETZ, Bd. 32, N. 29, 1911, 715.
115. Falkenthal E. Ein neuer Wechselstromgleichrichter für kleine Leistungen. ETZ, Bd. 32, N. 33, 1911, 828.
116. Stein P. Drehstrom-Gleichrichter für kleinere Leistungen. ETZ, Bd. 33, N. 3, 1912, 56.
117. Umformer für Gleich- und Wechselstrom. (Nach P. Hildebrand). ETZ, Bd. 34, N. 9, 1913, 246.
118. Wolf H. C. and H. Mathews. The design of high-voltage rectifiers. Electr. World, vol. 64, N. 18, 1914, 856.
119. Cairns C. F. The cabot converter. Proc. I. R. E., vol. 7, N. 3, 1919, 281.
120. Soulier A. Mechanische Gleichrichter. Ref.: ETZ, Bd. 41, 1920, 1039.
121. Schüller L. Ein neuer Pendelgleichrichter. ETZ, Bd. 42, N. 19, 1921, 481. Ref.: Sc. Abstr., Sect. B, vol. 24, 1921, N. 866.
122. Breslauer M. Eine neue Wechselstrommaschine mit unsymmetrischer Spannungs-kurve. ETZ, Bd. 42, N. 37, 1921, 1025.
123. Dowling J. J. and J. T. Harris. A vibrating-flame rectifier for high-tension currents. Proc. Dublin Soc., vol. 16, 1921, 171.
124. Barthélemy R. Aperçu théorique sur le convertisseur „Pax“ pour charge d'accumulateurs. R. G. E., vol. 9, N. 20, 1921, 697.
125. Barthélemy R. Convertisseur stato-mécanique. R. G. E., vol. 10, N. 19, 1921, 659.
126. Kade Fr. Die Umformung von Drehstrom in Gleichstrom. I. Die Umformung mittels rotierender Umformer. ETZ, Bd. 43, N. 4, 1922, 105. Disk.: 129; N. 12, 401.
127. Schäfer B. Mechanische Gleichrichter. ETZ, Bd. 44, 1923, 561.
128. Hydra-Wechselstrom-Gleichrichter. ETZ, Bd. 44, N. 10, 1923, 221.
129. Woodhull S. A high voltage mechanical rectifier. Proc. I. R. E., vol. 11, N. 2, 1923, 111.
130. Scroggie M. O. Voltage raiser for valve transmitters. W. W. and R. R., vol. 12, N. 20 (209), 1923, 660.
131. Hartmann J. Undesøgler over Gnisten ved en Kvaegsølvstraalekommutator. Danske Vidensk. Selsk. Math.-fys. Meddelelser, Bd. 5, Nr. 10, 1924.
132. Simmonds E. The construction of a tuned reed rectifier for 200 volt 50 cycle supply. E. W. & W. E., vol. 1, N. 4, 1924, 221.
133. Archibald R. D. The characteristics of a D. C. series machine self-excited by rectified current for purposes of regenerative control. Journ. I. E. E., vol. 62, N. 327, 1924, 233.
134. The English electric transverter. Theoretical and technical details of the Calverley-Highfield patents. Electrician, vol. 92, N. 2399, 1924, 567; 573.
135. Butement A. A simple rotary rectifier. E. W. & W. E., vol. 1, N. 11, 1924, 658.
136. Dyer H. Full wave rectifier. E. W. & W. E., vol. 1, N. 12, 1924, 728.
137. Pearson S. O. Rectifier for H. T. supply. W. W. and R. R., vol. 15, N. 4 (271), 1924, 102.
138. Tunkel M. Schwingungsvorgänge bei Nadelgleichrichtern. Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern, Bd. 4, 1925, 214.
139. Hartmann J. The jet-wave rectifier. Electr., vol. 99, 1927, 339.
140. Hartmann J. Development of the jet-wave rectifier. Engg., vol. 338, 1927, 377.
141. Hartmann J. Den konstruktive Udvikling af Straalebølgeensretteren. Elektrotekniker, 1927, N. 23. Ausführlicher Ref.: Güntherschulze. ETZ, Bd. 49, N. 33, 1928, 1224.
142. Tellert F. Ein mechanischer Wechselstromgleichrichter. ETZ, Bd. 48, 1927, 460.
143. Хараджа Ф. Выпрямители механические и электрические (кроме ртутных). СЭТ. Лг., Кубуш., 1928, т. 1, отд. 6, §§ 1—16, стр. 1—22.

V. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ.

144. Миткевич В. Алюминиевый выпрямитель переменного тока и его применение. *Электричество*, 1901, № 2, стр. 17.
145. Mitkewicz W. Ein Aluminiumstromrichter für Wechselstrom und seine Anwendung. *Phys. Z.*, Bd. 2, 1901, 747.
146. Holtz W. Sehr ungleiche Elektroden, Ventilzellen, Metallvegetationen. *Phys. Z.*, Bd. 6, 1905, 480.
147. Рубан А. Электролитические выпрямители. *Журн. Р. Ф.-Х. О., ч. физ.*, т. 38, отд. 2, вып. 1, 1906, стр. 26—29.
148. Рубан А. К теории алюминиевого выпрямителя. *Журн. Р. Ф.-Х. О., ч. физ.*, т. 39, отд. 1, вып. 4, 1907, стр. 116—122.
149. Güntherschulze A. Spannungsgefälle an Aluminiumanoden. *Ann. d. Phys.* (4), Bd. 22, N. 3, 1907, 543.
150. Güntherschulze A. Über das Verhalten von Tantalelektroden. *Ann. d. Phys.* (4), Bd. 23, N. 7, 1907, 226.
151. Güntherschulze A. Über die elektrolytische Ventilwirkung der Metalle Magnesium, Antimon und Wismut. *Ann. d. Phys.* (4), Bd. 24, N. 11, 1907, 43.
152. Güntherschulze A. Die elektrolytische Ventilwirkung des Niobs und eine Klassifizierung des Verhaltens elektrolytischer Anoden. *Ann. d. Phys.* (4), Bd. 25, N. 4, 1908, 775.
153. Güntherschulze A. Über die elektrolytische Ventilwirkung der Metalle Zink, Cadmium, Silber und Kupfer. *Ann. d. Phys.* (4), Bd. 26, N. 7, 1908, 372. Ref.: *ETZ*, Bd. 29, 1908, 62.
154. Grisson. Grisson-Gleichrichter. *ETZ*, Bd. 29, 1908, 959.
155. Güntherschulze A. Elektrolytische Gleichrichter. *ETZ*, Bd. 29, 1908, 1154.
156. Morse and Shuddemagen. On the properties of an aluminium anode. *Proc. Am. Acad.*, vol. 44, 1909, 367.
157. Carman A. P. and G. J. Balzer. The effect of pressure on the aluminium rectifier. *Phys. Rev.*, vol. 30, 1910, 776.
158. Balstro G. E. and R. Mercer. Some properties of aluminium anode films. *Chem. news.*, vol. 103, 1911, 153.
159. Güntherschulze A. Der Einfluss der Elektrolyte auf die Maximalspannung der elektrolytischen Ventilwirkung. *Ann. d. Phys.*, Bd. 34, 1911, 657.
160. Güntherschulze A. Die Maximalspannung der elektrolytischen Ventilwirkung in geschmolzenen Salzen. *Z. Electrochem.*, Bd. 17, 1911, 509.
161. Güntherschulze A. Zum elektrochemischen Verhalten des Eisens. *Z. f. Electrochem.*, Bd. 18, 1912, 327.
162. Güntherschulze A. Über die Kapazitäten der elektrolytischen Ventilwirkung in geschmolzenen Salzen und in absoluter Schwefelsäure. *Z. Electrochem.*, Bd. 18, 1912, 22.
163. Balstro G. E. A simple grouping for the electrolytic rectification of alternating currents of any number of phases. *Electrician*, vol. 69, N. 1784, 1912, 652.
164. Güntherschulze A. Die Mindestspannung der elektrolytischen Ventile in der durchlässigen Richtung. *Ann. d. Phys.* (4), Bd. 41, N. 8, 1913, 593. Ref.: *ETZ*, Bd. 35, 1914, 244.
165. Stebel K. Elektrolytischer Gleichrichter für starke Dauerbelastung. *ETZ*, Bd. 34, N. 34, 1913, 970.
166. Winter W. Ergebnisse einer Untersuchung von Metallen auf Gleichrichterwirkung. *Phys. Z.*, Bd. 14, 1913, 823.
167. Zenneck J. Das Verhalten von Aluminiumzellen, besonders bei Hochfrequenz. *Phys. Z.*, Bd. 14, 1913, 535.
168. Sborgi U. Über das anodische Verhalten des Urans. *Z. Electrochem.*, Bd. 19, 1913, 115.
169. Fichte und Jablczynski. Über das Berylliummetall. *Ber. Dt. Chem. Ges.*, Bd. 46, 1913, 1604.
170. Walter L. H. Valve action of circonium anodes. *Electr.*, vol. 71, 1913, 1057.
171. Greene, Clarence W. Polarisation in the aluminium rectifier. *Phys. Rev.*, vol. 3, 1913, 264.
172. Güntherschulze A. Die maximal möglichen Wirkungsgrade des elektrolytischen Aluminiumgleichrichters bei Verwendung wässriger Lösungen. *Arch. Elektrot.*, Bd. 3, 1914, 43.
173. Güntherschulze A. Die elektrolytische Metallabscheidung in Ventilzellen. *Ann. d. Phys.*, Bd. 44, 1914, 1106.
174. Güntherschulze A. und R. Lindemann. Über den Einfluss der elektrostatischen Kapazität und der Mindestspannung der elektrolytischen Ventile auf ihr Verhalten gegen Wechselstrom. *Phys. Z.*, Bd. 15, N. 5, 1914, 254.

175. Güntherschulze A. Über den Einfluss von Verunreinigungen des Elektrolyten auf die elektrolytische Ventilwirkung von Aluminium. Z. Elektrochem., Bd. 20, 1914, 307.
176. Fitch Albert Lewis. Counter electromotive force in the aluminium rectifier. Phys. Rev., vol. 9, 1917, 15.
177. Vaillant L. Sur la production d'un courant continu par application d'une force électromotrice alternative à un voltamètre à électrodes à platine. Comptes Rendus, vol. 168, 1919, 687.
178. Streintz Franz. Die Polarität einer Platinzelle. Phys. Z., Bd. 21, 1920, 477; Bd. 22, 1921, 141.
179. Streintz Franz. Die Polarität einer Platinzelle. Phys. Z., Bd. 22, 1921, 260.
180. Güntherschulze A. Die elektrolytische Ventilwirkung. Ann. d. Phys., Bd. 65, N. 11, 1921, 223. Ref.: ETZ, Bd. 43, N. 12, 1922, 396.
181. Güntherschulze A. und E. Alberti. Verhalten von Elektrolytgleichrichtern bei Hochfrequenz. Phys. Z., Bd. 23, N. 8, 1922, 188. Ref.: ETZ, Bd. 44, № 21, 1923, 501.
182. Robinson E. Notes on high tension electrolytic rectifiers. E. W. & W. E., vol. 1, N. 3, 1923, 154.
183. Bruyne H. A. de. The electrolytic rectifier. London, 1924.
184. Newman P. H. An oscillograph study of the aluminium valve. Phil. Mag. (8), vol. 49, 1925, 1629.
185. Robinson E. H. The tantalum rectifier. E. W. & W. E., vol. 2, N. 26, 1925, 889.
186. André H. Un nouveau redresseur statique le „Colloid“. Radioélectricité, vol. 6, N. 93, 1925, 370.
187. Meserve W. E. Some current-time relations in the aluminium cell. Phys. Rev. (2), vol. 30, 1927, 215.
188. Féry M. Les redresseurs électrolytiques. Bull. Soc. Franç. Electr. (4), vol. 7, N. 69, 1927, 574.
189. Audubert René. Sur l'effet de soupape présenté par une anode au silicium et son mécanisme. Comptes Rendus, vol. 185, 1927, 768.
190. Doucet I. La soupape électrolytique. QST Franç., N. 36, 1927, 14.
191. R. H. Aluminiumgleichrichter. E. u. M., Bd. 47, N. 4, 1929, 80.
192. Schaper Fritz. Das amerikanische Wechselstrom-Floating-Signalsystem (Balkite-Gleichrichter). ETZ, Bd. 50, N. 49, 1929, 1768.
193. André H. Redresseurs à anode colloïdale. Bull. Soc. Franç. Electr., vol. 9, N. 97, 1929, 961. Ref.: R. G. E., vol. 26, N. 13, 1929, 902.
194. Dobias A., L. Kramp und O. Lebedinskaja. Eine elektroosmotische Theorie des elektrolytischen Gleichrichters. Z. f. Phys., Bd. 61, 1930, 852.
195. McGregor, Malcolm E. The mechanism of electrolytic rectification. Nature, vol. 125, N. 3143, 1930, 128.

VI. СУХИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ И ДЕТЕКТОРЫ.

196. Brandes, H. Ober Abweichungen vom Ohmschen Gesetz, Gleichrichterwirkung und Wellenanzeiger der drahtlosen Telegraphie. ETZ, Bd. 27, 1906, 1015.
197. Voege W. Ein neues Messgerät für schwache Wechselströme. ETZ, Bd. 27, N. 19, 1906, 467.
198. Werthelm-Salomonsohn J. K. A. Die Messung von schwachen Wechselströmen. Phys. Z., Bd. 7, 1906, 463.
199. Pierce G. W. Carborundum as a rectifier for electric currents and electric oscillations. Electrician, vol. 60, N. 1544, 1907, 374.
200. Austin L. W. Kontakt-Gleichrichter. Phys. Z., Bd. 9, N. 8, 1908, 258.
201. Pickard G. W. Solid rectifiers. Electrician, vol. 63, N. 1626, 1909, 533.
202. Pierce G. W. Crystal rectifiers for electric currents and electric oscillations. Phys. Rev. (1), vol. 25, 31. Part I — Carborundum.
203. Pierce G. W. Crystal rectifiers for electric currents and electric oscillations. Part II — Carborundum, Molybdenite, Anatase, Brookite. Phys. Rev. (1), vol. 28, 153. Ref.: Electrician, vol. 64, N. 1649, 1909, 425.
204. Pierce G. W. Crystal rectifiers for electric currents and electric oscillations. Part III — Iron pyrites. Phys. Rev. (1), vol. 29, 487. Ref.: Electrician, vol. 64, N. 1656, 1910, 718.
205. Flowers A. E. Crystal and solid contact rectifiers. Phys. Rev. (1), vol. 29, 445. Ref.: Electrician, vol. 64, N. 1657, 1910, 760.
206. Leimbach G. Unipolares Leitvermögen von Kontaktdetektoren und ihre Gleichrichterwirkung. Phys. Z., Bd. 12, 1911, 229.
207. Scherling N. Zeigerinstrumente mit geringem Eigenverbrauch zur Messung kleiner Wechselstromstärken und Wechselspannungen. Z. f. Instrumentenkunde, Bd. 32, 1912, 99, 101

208. Sutton Henry. Production of rectifiers by physical means. *Electrician*, vol. 69, N. 1770, 1912, 66.
209. Flowers A. E. Characteristics of crystal rectification. *Ref.: Electrician*, vol. 74, N. 1908, 1914, 326.
210. Rinkel R. Die Wirkungsweise des Kontaktdetektors. *Jahrb. d. d. T. u. T.*, Bd. 9, 1915, 88.
211. Hausrath H. Die Wirkungsweise des Kontaktdetektors. *Jahrb. d. d. T. u. T.*, Bd. 10, 1916, 64.
212. Greinacher H. und C. W. Müller. Anomale Gleichrichterwirkung. *Verh. Dt. Phys. Ges.*, Bd. 18, 1916, 283.
213. Pfund A. H. The light sensitiveness of copper oxide. *Phys. Rev.* (2), vol. 7, N. 3, 1916, 289.
214. Hunt V. A. and L. E. Whittemore. Some characteristics of crystal detectors. *Phys. Rev.* (2), vol. 7, N. 5, 1916, 518.
215. McDowell L. S. and F. G. Wick. A study of the law of response of the silicon detector. *Phys. Rev.* (2), vol. 8, N. 2, 1916, 133.
216. Bergholm C. Ein detector mit gelöteten Kontakten. *Ann. d. Phys.* (4), Bd. 52, N. 1, 1917, 101.
217. Eitenreich R. Reaktionszeit von Kontaktdetektoren. *Wiener Ber.*, Bd. 128, 1919, 1169.
218. Sulejkin Was. Electric discharge on the surface of a solid electrolyte. *Phys. Rev.* (2), vol. 13, N. 3, 1919, 197.
219. Hülzinga M. J. Die Gleichrichterwirkung von Kristalldetektoren. *Phys. Z.*, Bd. 21, 1920, 91.
220. Streintz und Wesely. Über unipolare Leitung an Kristallen. *Phys. Z.*, Bd. 21, 1920, 42.
221. Florisson C. Sur le contact rectifiant galène-métal, sensibilisation artificielle et remarques diverses. *Comptes Rendus*, vol. 171, 1920, 106.
222. Szekely A. Die Kontaktdetektoren als Messinstrumente für Wechselstrom. *Wiener Ber.*, Bd. 131, 1921, 39.
223. Zenneck J. Die Trägheit von Thermodetektoren. *Jahrb. d. d. T. u. T.*, Bd. 17, N. 3, 1921, 162.
224. Hoffmann G. Zur Erklärung der unipolaren Leitung. *Phys. Z.*, Bd. 22, 1921, 422.
225. Dowsett H. M. Carborundum and its rectification effect. *Radio Rev.*, vol. 2, 1921, 583.
226. Luchsinger F. Über die Wirkungsweise des Siliziumkarbid-Detektors. *Phys. Z.*, Bd. 22, 1921, 487.
227. Hoffmann G. Der Elektronenaustritt aus Metallen unter der Wirkung hoher Feldstärken. *Z. f. Phys.*, Bd. 4, 1921, 363.
228. Rother F. Über Elektronenentladung bei kleinen Elektrodenabständen. *Phys. Z.*, Bd. 23, 1922, 423.
229. Zahn H. Über den Gleichrichtereffekt an belichteten Zinkblendekristallen. *Z. techn. Phys.*, Bd. 8, 1922, 382.
230. Schottky W. Über kalte und warme Elektronen-Entladungen. *Z. f. Phys.*, Bd. 14, 1923, 63.
231. Strachan J. Crystal detectors in theory and practice. *W. W. and R. R.*, vol. 13, 1924, 245.
232. Precht J. Versuch über Detektorwirkung. *Verh. Dt. Phys. Ges.* (3), Bd. 6, 1925, 38.
233. Stransky J. Über die Gleichrichterwirkung der Kontaktdetektoren. *Z. phys. Chem.*, Bd. 113, 1925, 131.
234. Frey F. Über Unipolaritätserscheinungen an gepressten Pulvern. *Phys. Z.*, Bd. 26, 1925, 849.
235. Ball A. und E. Ball. Die Gleichrichterwirkung des Kontakts: Halbleiter-Metall. *Z. f. Phys.*, Bd. 35, 1925, 207.
236. Merritt E. On contact rectification by metallic germanium. *Proc. Nat. Acad. Amer.*, vol. 11, 1925, 743.
237. Merritt E. The effect of light on the behaviour of selenium contact rectifiers. *Proc. Nat. Acad. Amer.*, vol. 11, 1925, 572.
238. James A. C. The rectification of alternating currents by crystals. *Phil. Mag.* (6), vol. 49, N. 292, 1925, 681.
239. Colebrook F. M. The rectifying detector. Parts 1—3. *E. W. & W. E.*, vol. 2, 1925, N. 18, 330; N. 19, 394; N. 20, 459.
240. Colebrook F. M. Crystal detectors. The electrical properties of contact rectifiers. *W. W. and R. R.*, vol. 17, 1925, N. 10, 293; N. 13, 407; N. 15, 481; N. 22, 744.
241. Cayrel J. Sur la détection des galènes. *Comptes Rendus*, vol. 180, 1925, 1798.

242. Cayrel J. Propriétés détectrices du bioryde de plomb. Comptes Rendus, vol. 181, 1925, 1127.
243. André H. Conductibilité par les colloïdes métalliques et ses applications électro-techniques. Comptes Rendus, vol. 181, 1925, 243.
244. Rother F. Austritt von Elektronen aus kalten Metallen. Phys. Z., Bd. 27, 1926, 471.
245. Ippisch Karl. Die Leistungspolarität bei Ventileffekten. Phys. Z., Bd. 27, 1926, 199.
246. Dinsdale A. The Ruben rectifier. A new contact rectifier for trickle charging. W. W. and R. R., vol. 19, N. 12, 1926, 423. Ref.: E. u. M., N. 6, 1927, Radiotechnik, N. 2, 19.
247. Grondahl L. O. A new type of contact rectifier. (Proc. of the Amer. Phys. Soc. Abstracts, N. 63.) Phys. Rev. (2), vol. 27, 1928, 813.
248. Grondahl L. O. Theories of new solid junction rectifiers. Science (Amer.), vol. 64, 1926, 306.
249. Moll W. J. H. A reliable thermo-converter. Journ. Sc. Instr., vol. 3, 1926, 209.
250. Pélabon H. Sur la détection par les contacts métalliques. Détecteur symétrique. Comptes Rendus, vol. 182, 1926, 1605.
251. Pélabon H. Sur la détection et la stabilité de certains détecteurs. Comptes Rendus, vol. 182, 1926, 124.
252. Pélabon H. Sur le mécanisme de la détection. Comptes Rendus vol. 182, 1926, 449.
253. Pélabon H. Sur les contacts rectifiants. Comptes Rendus, vol. 183, 1926, 491.
254. Guillet A. Sur le contact rectifiant. Comptes Rendus, vol. 183, 1926, 350. Ref.: R. G. E., vol. 20, N. 12, 1926, 400.
255. Leopold Fritz. Über die Elektrizitätsleitung im festen Kupfer-Bromid. Dissertation. Hamburg, 1927.
256. Schleede Arthur und Heinz Buggisch. Zur Frage der Richtung des „gleichgerichteten“ Stromes beim Kristalldetektor. Phys. Z., Bd. 28, N. 4, 1927, 174. Ref.: E. u. M., Bd. 45, N. 34, 1927, Radiotechnik, N. 10, 93.
257. Schleede Arthur und Heinz Buggisch. Untersuchungen am Bleiglanz- und Pyritdetektor. Z. anorg. Chem., Bd. 161, 1927, 85.
258. Grondahl L. O. and P. H. Geiger. A new electronic rectifier. Trans. A. I. E. E., vol. 46, 1927, 357.
259. Grondahl L. O. and P. H. Geiger. A new electronic rectifier. Journ. A. I. E. E., vol. 46, N. 3, 1927, 215. Disc.: vol. 46, N. 5, 1927, 505. Ref.: E. u. M., Bd. 45, N. 37, 1927, 747; ETZ, Bd. 48, N. 47, 1927, 1738.
260. Lillienfeld J. E. and C. H. Thomas. High pressure powder contact rectifier. Phys. Rev. (2), vol. 29, 1927, 367.
261. Ogawa W., C. Nemoto and S. Kaneko. A further investigation of synthetic galena detector and a new theory of crystal rectifiers. Res. Electrot. Lab. Tokyo, 1927, N. 196.
262. Metal rectifiers. Electrician, vol. 99, N. 2581, 1927, 626.
263. Cayrel M. Sur la rectification de contact. J. Phys. et le Radium (6), vol. 8, 1927, 88. S. (Bull. Soc. Fr. Phys., № 249.)
264. Dubar L. Sur une vérification de la théorie des détecteurs et redresseurs à contact. Comptes Rendus, vol. 185, 1927, 1023.
265. Siegler Theodor. Über unipolare Leitung. Dissertation. Münster i. W., 1928.
266. Kallmeyer F. W. Untersuchungen an Detektorkontakten. Ann. d. Phys. (4), Bd. 86, N. 12, 1928, 547.
267. Reissaus Georg Günther. Mitteilung zum Kristalldetektorproblem. Phys. Z., Bd. 29, 1928, N. 8, 223; N. 18, 655.
268. Beck Paul. Weitere Mitteilungen zum Kristalldetektorproblem. Phys. Z., Bd. 29, 1928, 436.
269. Regler Fritz. Vorläufige Mitteilung über die Theorie des Kontaktdetektors. Phys. Z., Bd. 29, 1928, 429.
270. Irion O. Der neue Trockengleichrichter. Siemens-Z., Bd. 8, N. 5, 1928, 293.
271. Ogawa Wakasabro. Analogy between the crystal detector and a vacuum tube. Phil. Mag. (7), vol. 6, 1928, 175.
272. Ogawa Makasabro, Chujiro Nemoto and Seiji Kaneko. The effect of chemical composition on the sensivity of galena as a radiodetector and the cold emission from crystals. Res. Elektrot. Lab. Tokyo, 1928, N. 250.
273. Slepian J. Thin film rectifiers. Trans. Am. Electrochem. Soc., vol. 54, 1928, 204.
274. Dubar L. Conducteurs n'obéissant pas à la loi d'Ohm. Les soupapes électriques à contact. R. G. E., vol. 24, N. 4, 1928, 153.
275. Audubert René. La théorie électronique et le mécanisme de l'effet de soupape dans les cellules électrolytiques. R. G. E., vol. 24, N. 20, 1928, 737.
276. Шпейдер А. Купроновыя выпрямитель. Радиолюбитель, т. 6, № 11, 1929, стр. 416.

277. Deutschmann W. und W. Schottky. Scheinwiderstand-Messung an Kupferoxydul-Gleichrichtern. ETZ, Bd. 50, N. 50, 1929, 1803.
278. Trockengleichrichter (Te Ka De). ETZ, Bd. 50, N. 9, 1929, 328.
279. Schottky W. und W. Deutschmann. Zum Mechanismus der Richtwirkung in Kupferoxydulgleichrichtern. Phys. Z., Bd. 30, N. 22, 1929, 839.
280. Kost H. Leitfähigkeitsänderungen von Kupferoxydul. Z. f. Phys., Bd. 54, 1929, 367.
281. Habann Erich. Der Kupferjodürdetektor. Z. f. techn. Phys., Bd. 10, N. 1, 1929, 25.
282. Feitknecht W. Über die Oxydation des Kupfers bei hoher Temperatur. Z. f. Elektrochem., Bd. 35, N. 3, 1929, 142.
283. Wuest A. Der Kupferoxydul-Gleichrichter. Radio-Händler, Bd. 6, N. 2, 1929, 78.
284. Irion O. Über die Wirkung der Trockengleichrichter. Helios, Fach Z. f. Elektrot., Bd. 35, N. 46, 1929, 415.
285. „Ismet“-Trockengleichrichter für Heiẑbatterien. Helios, Export — Z. f. Elektrot., Bd. 35, N. 8, 1929, 233.
286. Santini D. and I. R. Smith. The Rectox rectifier. Electr. Journ., vol. 26, N. 9, 1929, 416.
287. Banner E. H. W. Rectifier instruments for A. C. An account of the application of copper oxide rectifiers to moving instruments. Electr. Rev., vol. 104, N. 2685, 1929, 823.
288. Kronig R. de L. The theory of electrical rectification. Nature, vol. 123, N. 3096, 1929, 314.
289. Leblanc Maurice. Le redresseur Rectox. Bull. Soc. Franç. Electr. (4), vol. 9, N. 90, 1929, 207.
290. Leblanc Maurice. Le redresseur Rectox à oxyde de cuivre. Bull. Soc. Franç. Electr., vol. 9, N. 98, 1929, 1061. Ref.: Ann. d. P. T. T., vol. 19, N. 3, 1930, 269—277.
291. Audubert R. et M. Quintin. Sur le mécanisme de la conductibilité dissymétrique des contacts imparfaits. Comptes Rendus, vol. 188, N. 1, 1929, 52. Ref.: R. G. E., vol. 25, N. 5, 1929, 167.
292. Pélabon H. Sur la rectification par les mauvais contacts purement métalliques. Comptes Rendus, vol. 188, N. 5, 1929, 382.
293. Demontvignier Marcel. Les redresseurs à oxyde de cuivre. Onde Electr., vol. 8, N. 89, 1929, 192. Ref.: R. G. E., vol. 26, N. 13, 1929, 933.
294. Лепешинская-Красав В. Медно-закисные детекторы. Вестник электротехники, разд. 1, 1930, № 5, 179—188.
295. Graffunder W. Über den lichtelektrischen Effekt bei Trockengleichrichtern. Phys. Z., Bd. 31, 1930, 375.
296. Ismet-Gleichrichter und Transformatoren für Radio und Elektrotechnik. Helios, Export — Z. f. Elektrot., Bd. 36, N. 9, 1930, 309.
297. Über die Wirkungsweise der Metalloxydgleichrichter. Helios, Bd. 36, N. 11, 1930, Radio-Technik und -Export, 23.
298. Feitknecht W. Über die Oxydation des Kupfers bei hoher Temperatur. Bemerkung zu der Kritik von P. J. Wilkins. Z. f. Elektrochem., Bd. 36, N. 1, 1930, 18.
299. Pélabon H. Sur le redresseur à oxyde de cuivre. Comptes Rendus, vol. 190, N. 10, 1930, 630.
300. Barré Jean. Les redresseurs secs. Etude théorique et pratique. Radiotélectr. et QST Fr., vol. 11, N. 71, 1930, 46.
301. Held S. Nouveaux dispositifs de mesure de courants alternatifs avec appareils à cadre mobile et aimant permanent. R. G. E., vol. 27, 1930, N. 8, 277; N. 9, 317.
302. Sagerdote G. Prove su raddrizzatori ad ossido di rame. L'elettrotecnica, vol. 17, N. 5, 1930, 106.

VII. ВЫПРЯМИТЕЛИ С НАКАЛЕННЫМ КАТОДОМ.

ВАКУУМНЫЕ И ГАЗОВЫЕ.

303. The kenotron. Electrician, vol. 75, N. 1932, 1915, 276.
304. Meikle G., Stanley. The hot cathode argon gas filled rectifier. G. E. R., vol. 19, N. 4, 1916, 297. Ref.: Раднотехн., т. 2, № 7, 1919, стр. 159.
305. Russel R. E. The tungar rectifier. G. E. R., vol. 26, N. 3, 1917, 209.
306. Бонч-Бруевич М. Катодный выпрямитель с пустотой для 15 000 в. Т. и Т. 6. а., т. 2, № 6, 1919, стр. 28.
307. Scott-Taggart John. A new low-power lamp rectifier of alternating current. Electrician, vol. 84, N. 2188, 1920, 451.
308. Eppen Ferd. Über Gleichrichter für funktentelegraphischen Schnellempfang. Jahrb. d. d. T. u. T., Bd. 20, 1922, 173.

309. Moullin E. B. and L. B. Turner. The thermionic triode as rectifier. Journ. I. E. E. vol. 50, 1922, 706.
310. Leblanc Maurice. Sur les lampes à trois électrodes, anode, cathode et grille intermédiaire où le courant est transporté par des ions et leurs applications. Comptes Rendus, vol. 175, 1922, 132.
311. Szekely A. Über die Verwendung der Hochvakuum-Eingitterröhre zur absoluten Messung schwacher Wechselspannungen im Gitterkreis. Wien. Ber., Bd. 131, 1923, 39.
312. Schmidt A. High-voltage thermionic rectifiers. G. E. R., vol. 26, N. 2, 1923, 116.
313. Schmidt A. 30-kilowatt 15 000-volt rectifier for the United States Navy. G. E. R., vol. 26, N. 5, 1923, 276.
314. Hull Albert W. A combined kenotron rectifier and pilotron receiver capable of operating by alternating current power. Proc. I. R. E., vol. 11, 1923, 89.
315. Hull Albert W. The axially controlled magnetron. A new type of magnetron, controlled by current through the filament. Journ. A. I. E. E., vol. 42, N. 10, 1923, 1013. Ref.: R. G. E., vol. 16, N. 11, 1924, 421.
316. Селезнев А. Современные электронные выпрямители. Электричество, 1924, № 7, стр. 339.
317. Maxstadt F. W. Obtaining steady high-voltage direct current from a thermionic rectifier without a filter. Journ. A. I. E. E., vol. 43, 1924, 1055.
318. Loewenherz A. Improvisation des elektrischen Ventils mit Holtzschen Fussklemmen. Z. Phys. Unterr., Bd. 38, 1925, 89.
319. Knoll Hermann. Ein Wechselstromgleichrichter für höhere Spannungen. Z. Phys. Unterr., Bd. 38, 1925, 89.
320. Norden K. Rectignongleichrichter. ETZ, Bd. 46, 1925, 1730.
321. Messungen an Kleingleichrichtern. Bull. Schweiz. Elektrot. Ver., Bd. 16, 1925, 606.
322. Shearing G. Wireless telegraph valve transmitters employing rectified alternating current. Journ. I. E. E., vol. 63, N. 339, 1925, 309.
323. Sutton J. F. Thermionic rectifier for battery charging. Tests on a new and inexpensive valve. W. W. and R. R., vol. 17, N. 18, 1925, 573.
324. MacWellauer. Messungen des Spannungsabfalles an Hochspannungs-Elektronenröhren an einer Einrichtung zur Beeinflussung derselben. Arch. Elektrot., Bd. 16, 1926, 13.
325. Baggally W. The valve bridge. A new method of measuring the anode impedance and voltage factor. Journ. Sc. Instr., vol. 3, 1926, 209.
326. Sayce L. A new valve rectifier. E. W. & W. E., vol. 3, N. 32, 1926, 269.
327. Skeet T. A high-tension rectifier for a low-power transmitter. E. W. & W. E., vol. 3, N. 37, 1926, 599.
328. Dacos F. Etude du redressement du courant alternatif par les tubes à vide. Bull. Assoc. Ing. El. Liège, vol. 4, 1926, 193; Diac.: 214. Ref.: R. G. E., vol. 21, N. 24, 1927, 960.
329. Новые типы электронных усилительных ламп и электронных выпрямителей Треста заводов слабого тока. Электросвязь, 1927, № 1, стр. 28.
330. Стахорский К. Производство генераторных ламп на ленинградском электровакуумном заводе. Электросвязь, 1927, № 3, стр. 14.
331. Bareiss M. Technische Kleingleichrichter für Rundfunkzwecke. ETZ, Bd. 48, N. 45, 1927, 1659.
332. Bareiss M. Kleingleichrichter für Rundfunkzwecke. Z. techn. Phys., Bd. 8, 1927, 449.
333. Simon A. Die Entwicklung im Elektronenröhrenbau. Z. techn. Phys., Bd. 8, 1927, 434.
334. Gernershausen Werner. Vollautomatische Gleichrichter-Ladeeinrichtungen für Elektrokarren-Batterien. Helios, Bd. 33, 1927, Radio-Technik, 316.
335. Rottmann O. Ein neues Netzanschlussgerät. Funk Bastler, 1927, N. 6, 89; N. 7, 103.
336. Riemenschnieder K. Das Anodenspannungsgerät. Funk Bastler, 1927, N. 46, 657; N. 47, 685.
337. Gehrts A. Glühkathodengleichrichter von Siemens & Halske mit thorierter Molybdänkathode. Helios, Fach-Z. f. Elektrot., Bd. 33, N. 50, 1927, 471.
338. Gehrts A. Glühkathodengleichrichter von Siemens & Halske mit thorierter Molybdänkathode. Siemens-Z., Bd. 7, N. 8, 1927, 559.
339. Fortescue C. L. The characteristics of thermionic rectifiers. Proc. Phys. Soc., vol. 39, 1927, 313.
340. Picken W. J. Cooled anode valves, and lives of transmitting valves. Journ. I. E. E., vol. 65, 1927, 791.
341. The KLI Valve (Электронная лампа с накалом посредством подогрева). Electr., vol. 98, 1927, 118.
342. Elwell C. F. The Holweck demountable type valve. Journ. I. E. E., vol. 65, 1927, 784.
343. Owen D. Demonstration with magnetron. Proc. Phys. Soc., vol. 39, 1927, 466.

344. Morris-Airy H., G. Shearing and H. C. Hughes. Silica valves in wireless telegraphy. Journ. I. E. E., vol. 65, 1927, 786.
345. Best G. „ABC“ socket power for large tubes. Radio, vol. 9, N. 7, 1927, 25.
346. Dent H. Home A. C. charger. W. W. and R. R., vol. 21, N. 14, 1927, 468.
347. Fromy E. Filtre thermionique pour l'alimentation d'un récepteur sur secteur alternatif. Onde Electr., N. 64, 1927, 159.
348. Müller und F. Tank. Über das Verhalten von Glühkathodengleichrichtern bei sehr hohen Frequenzen. Helv. Phys. Acta. 1, N. 7—8, 1928, 447. (C. R. Séances Soc. Suisse de Phys., Lausanne, 1928).
349. Voorhoeve N. A. J. Ein für praktische Verwendung geeignetes Verfahren für Spannungsregelung an Generatoren mit Hilfe von Hochvakuumröhren. Arch. f. El., Bd. 21, N. 3, 1928, 228. Ref.: T. u. T. 6. n., т. 10, № 53, 1929, стр. 195.
350. Hull Albert W. Gas-filled thermionic tubes. Trans. A. I. E. E., vol. 47, N. 3, 1928, 753. Abridgement: Journ. A. I. E. E., vol. 47, N. 11, 1928, 798. Ref.: Jahrb. d. T. u. T., Bd. 33, N. 6, 1929, 232. Ref.: Journ. I. E. E. of Japan, N. 488, 1929, 44; Ref.: RGE, v. 25, 1929, 386.
351. Benhan W. E. A study of the rectification efficiency of thermionic valves at moderately high frequencies. Phil. Mag. (7), vol. 5, 1928, 323.
352. Kuhlmann John H. and James P. Barton. The vacuum tube rectifier. Oscillographic and vacuum tube voltmeter study of its application to D-voltage supply for radio receivers. Trans. A. I. E. E., vol. 47, N. 1, 1928, 299. Ty же paдory cm.: Journ. A. I. E. E., vol. 47, N. 1, 1928, 17.
353. Bruyère. Nouvelles valves thermioniques sous tensions élevées. Journ. de Phys. (6); vol. 9, N. 12, 1928, 139. (Bull. Soc. Fr. de Phys., N. 269).
354. Rectronröhren. ETZ, Bd. 50, N. 9, 1929, 317.
355. Stüber. Die Stromversorgungsanlage der Deutschen Reichspost. ETZ, Bd. 50, N. 35, 1929, 1253.
356. Strigel R. Fortschritte im Bau von Hochspannungs-Glühventilröhren. E. u. M., Bd. 47, N. 49, 1929, 1092.
357. Strigel R. Glühkathodengleichrichter für hohe Spannungen. Siemens-Z., Bd. 9, 1929, N. 7, 448; N. 8, 487.
358. Bubert und Wolfgang Müller. Der „Varta-Duplex“ Radio-Gleichrichter der Akkumulatoren-Fabrik Aktiengesellschaft. Z. f. Fernmeldetechnik, Bd. 10, N. 4, 1929, 55.
359. Hull Albert W. Hot-cathode thyatrons. Q. E. R., vol. 32, 1929, N. 4, 213; N. 7, 390.
360. Gas-filled rectifying valves. E. W. and W. E., vol. 6, N. 69, 1929, 291.
361. Ein neues Ladegerät. ETZ, Bd. 51, N. 10, 1930, 362.
362. Gernershausen Werner. Fortschritte auf dem Gebiete des Oxyd-Kathoden-Gleichrichters. Helios, Fach-Z. f. Elektrot., Bd. 36, 1930, N. 1, 1; N. 2, 9.
363. Pohlhausen Karl. Hochspannungsventilröhren mit kräftigsten Glühdrähten. Wiss. Ver. a. d. Siemens-Konzern, Bd. 8, N. 3, 1930, 75.
364. Mains rectifiers. Calculating applied voltages from the regulation curve. W. W. and R. R., vol. 26, N. 8, 1930, 206.

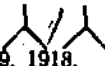
VIII. ГАЗОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ С ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ

365. Wolcott E. R. and C. J. Erickson. An air-blast rectifier of high tension alternating currents. Phys. Rev. (2), vol. 9, N. 6, 1917, 480.
366. Schröter Fritz. Die Technik der Entladungsröhren. ETZ, Bd. 40, N. 52, 1919, 685.
367. Neuere Gleichrichter und Ladevorrichtungen für Sammlerbatterien. ETZ, Bd. 42, N. 21, 1921, 544.
368. Bush V. and C. Smith. A new rectifier. Proc. I. R. E., vol. 10, N. 1, 1922, 41.
369. Kneser Hans. Untersuchungen an einem Glimmgleichrichter. Ann. d. Phys., Bd. 72, 1923, 519.
370. Schröter Fritz. Glimmgleichrichter. Z. f. Fernmeldetechnik, Bd. 4, 1923, 67.
371. Schröter Fritz. Über Edelgas-Ventilröhren. E. u. M., B. 41, 1923, 417.
372. Schröter Fritz. Überspannungsventile. ETZ, Bd. 44, 1923, 1016.
373. Brown Hugh A. and Chas. T. Knipp. Alkali vapor detector tubes. Journ. A. I. E. E., vol. 43, N. 1, 1924, 26.
374. „S-tube“ rectifiers. E. W. & W. E., vol. 2, N. 15, 1924, 170.
375. Garrat G. R. Short-path discharge rectifiers. E. W. & W. E., vol. 2, N. 20, 1925, 471.
376. Brandenburger L. Ein Gleichrichter zur Dauerladung von Akkumulatoren für Relais-Schutzanlagen. Siemens-Z., Bd. 6, N. 1, 1926, 1.
377. Seibt G. Netzanschlussgerät mit Glimmrohr für Anodenstrom. ETZ, Bd. 48, N. 47, 1927, 1741. Ref.: E. W. & W. E., vol. 5, N. 56, 1928, 1251.

376. LA valve V 70. Licence Raythéon. Bull. Soc. Fr. Radioélectr., N. 2, 1927, 22—25.
 379. Seibt O. Das Glümlichtrohr als Gleichrichter von Wechselströmen. ETZ, Bd. 49, N. 29, 1928, 1077. Ref.: E. u. M., Bd. 47, N. 10, 1929, 208.
 380. Simon N. und M. Bareiss. Die deutsche Raythéon-Röhre. ETZ, Bd. 49, N. 44, 1928, 1604. Ref.: Jahrb. d. d. T. u. T., Bd. 33, N. 5, 1929, 196.
 381. Eine neue Gleichrichterröhre. (Telefunken RGN 1500). ETZ, Bd. 50, N. 26, 1929, 941.
 382. Teucke Karl. Neue Glümlichtgleichrichter. Jahrb. d. d. T. u. T., Bd. 33, N. 4, 1929, 145.
 383. Toulon Pierre. Convertisseur de courant électrique de grande puissance à étincelle pilote. R. G. E., vol. 25, 1929, N. 13, 477; N. 14, 518. Ref.: ETZ, Bd. 51, N. 16, 1930, 578.

IX. РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ.

384. Der Cooper-Hewittsche Gleichrichter. ETZ, Bd. 24, N. 10, 1903, 187.
 385. Recklinghausen Max v. Die Quecksilberlampe und sonstige Quecksilbervakuumapparate. Vortrag. ETZ, Bd. 25, N. 51, 1904, 1102.
 386. Stark J., T. Retschinsky und A. Schaposchnikoff. Ann. d. Phys. (4), Bd. 18, N. 12, 1905, 213.
 387. Steinmetz Ch. Constant current mercury arc rectifier. Proc. I. R. E., 1905, 743. Ref.: ETZ, Bd. 26, N. 41, 1905, 951.
 388. Die Quecksilberdampf Lampe als Wechselstrom-Gleichstrom-Umformer. ETZ, Bd. 27, N. 6, 1906, 123.
 389. Polak Josef. Der Quecksilberlichtbogen und seine technische Verwendung. ETZ, Bd. 28, N. 24, 1907, 599; N. 26, 651; N. 30, 733.
 390. Hahn K. Quecksilberdampfgleichrichter. ETZ, Bd. 29, 1908, 178, 198.
 391. Sahulka J. Zur Kenntnis des Quecksilberdampflichtbogens als Gleichrichter. ETZ, Bd. 29, 1908, 1036.
 392. Güntherschulze A. Versuche an Quecksilbergleichrichtern. ETZ, Bd. 30, N. 13, 1909, 295.
 393. Güntherschulze A. Messung des Rückstromes in Quecksilbergleichrichtern. ETZ, Bd. 30, N. 16, 1909, 373.
 394. Jackson R. P. The mercury rectifier. Electric Journ., vol. 6, 1909, 397.
 395. Höpner W. Der Quecksilberdampfgleichrichter. Mitt. Telegr. Versuchsanstalt d. Reichs-Postamts, Bd. 6, 1910—1912, 49.
 396. Güntherschulze A. Betrag und Kurvenform des Rückstromes im Quecksilbergleichrichter. ETZ, Bd. 31, 1910, 28.
 397. Schäfer B. Verfahren zur Compoundierung von Wechselstromgeneratoren mittels Quecksilberdampfgleichrichtern. ETZ, Bd. 31, N. 3, 1910, 55.
 398. Hechler W. Über die neuesten Ausführungen der Quecksilberdampfgleichrichter. ETZ, N. 41, 1910, 1053.
 399. Белявский А. Ртутные выпрямители переменного тока. Спб., 1911.
 400. Белявский А. Ртутные выпрямители переменного тока. Труды 6-го Всероссийск электротехн. съезда, Спб., 1911, вып. 2-8, стр. 129.
 401. Schäfer Bela B. Ein neuer Quecksilberdampfgleichrichter für grosse Leistungen. ETZ, Bd. 32, 1911, 2.
 402. Hechler W. The latest types of mercury converter. Electrician, vol. 66, N. 1709, 1911, 743.
 403. Elliott J. W. and C. S. Parsons. Experiments on a mercury arc converter. Electrician, vol. 67, N. 1730, 1911, 534.
 404. Tschudy W. Experimentelle Untersuchungen am Quecksilberdampfgleichrichter für Wechselstrom. Doktordissertation. Zürich, 1912. Bespr.: Güntherschulze A. ETZ, Bd. 42, N. 42, 1912, 1088; Erwid.: W. Tschudy und Güntherschulze A. ETZ, Bd. 34, N. 11, 1913, 310.
 405. Schäfer Bela B. Neuerungen im Bau von Metaldampfgleichrichtern und ihre Erprobung in der Praxis. ETZ, Bd. 33, N. 45, 1912, 1164.
 406. Brachett Q. A. Mercury arc rectifier. Electr. Journ., vol. 9, 1912, 561.
 407. Schäfer B. Über Quecksilberdampfgleichrichter für grosse Leistungen. Diss. Frankfurt a/M., 1913.
 408. Tschudy W. Einfluss der Kurvenform auf den Wirkungsgrad eines Quecksilberdampfgleichrichters. Arch. f. Elektrot., Bd. 1, N. 9, 1913, 415.
 409. Güntherschulze A. Die Abhängigkeit der Verluste im Quecksilbergleichrichter von der Stromstärke und Frequenz des gleichzurichtenden Wechselstromes. Arch. f. Elektrot., Bd. 1, N. 11, 1913, 491. Ref.: ETZ, Bd. 34, N. 25, 1913, 718.
 410. Hartmann-Kempf. Quecksilberdampfgleichrichter. ETZ, Bd. 34, N. 9, 1913, 259.

411. Busch Hans. Verhalten des Quecksilberlichtbogens und des Quecksilbergleichrichters bei schnellen Schwingungen. Phys. Z., Bd. 14, 1913, 524.
412. Leblanc Maurice. Mercury vapour converter. Electrician, vol. 71, N. 1835, 1913, 600.
413. Белявский А. Ртутные выпрямители переменного тока. Извест. Донск. политехн. и-та, т. 3, 1914, стр. 102.
414. Meyer F. W. Quecksilbergrossgleichrichter und die Regulator- und Kommutierungsfrage. ETZ, Bd. 35, N. 1, 1914, 6; N. 2, 29.
415. Jaeger W. Quecksilbergleichrichter im Wechselstromkreise. Arch. f. Elektrot., Bd. 2, N. 10, 1914, 18.
416. Tschudy W. An analysis of vapour-rectifier losses. Electr. World, vol. 67, N. 23, 1916, 1409.
417. Tschudy W. M. Messverfahren und Definition für den Quecksilberdampfgleichrichter. ETZ, Bd. 38, 1917, 6; 23.
418. Bauch R. Das Verhalten des nach  geschalteten Kerntransformators bei einspüliger Last und bei Defect. ETZ, Bd. 39, 1918,
419. Schäfer Bela B. Parallelschaltung und Spannungsregelung von Grossgleichrichtern. ETZ, Bd. 39, 1918, 321.
420. Keller S. Untersuchungen am Quecksilberdampfgleichrichter. Diss. Zürich, 1919.
421. Nielsen Hans. Über die Kurvenform des Stromes und der Spannungen an Quecksilberdampfgleichrichter für Einphasenstrom. ETZ, Bd. 40, 1919, 224. Brief an die Red.: W. Höpp. Zur Theorie der Gleichrichter. ETZ, Bd. 40, N. 51, 1919, 681. Brief an die Red.: H. Nielsen. ETZ, Bd. 41, N. 16, 1920, 323.
422. Kleeberg F. Der Quecksilberdampfgleichrichter der Glastype, seine Theorie und praktische Ausführung. ETZ, Bd. 41, 1920, N. 8, 145; N. 9, 171; N. 10, 193. Erwid. u. Antw. W. Tschudy und F. Kleeberg. ETZ, Bd. 42, N. 34, 1921, 955.
423. Quecksilberdampfgleichrichter mit Selbstbewegung. ETZ, Bd. 41, N. 22, 1920, 437.
424. Clarnfeld. Der Quecksilberdampfgleichrichter. Umschau, Bd. 24, 1920, 327.
425. Wolff W. Quecksilberdampfgleichrichter. Zentralbl. Optik u. Mech., Bd. 41, 1920, 56.
426. Mercury arc rectifiers for large outputs. Electrician, vol. 84, N. 2172, 1920, 10.
427. Giroz H. Les redresseurs à vapeur de mercure à grand débit. R. G. E., vol. 8, 1920, 721.
428. Quecksilberdampfgleichrichter (AEG). ETZ, Bd. 42, N. 19, 1921, 493.
429. Höpp W. Fortschritte im Bau von Quecksilberdampfgleichrichtern. ETZ, Bd. 42, N. 37, 1921, 1032.
430. Nielsen Hans. Die Vorausberechnung von Drehstrom-Quecksilberdampfgleichrichtern. ETZ, Bd. 42, N. 42, 1921, 1185.
431. Калантаров П. Современные ртутные выпрямители. Техничко-экономическ. вестн., т. 2, № 3, 1922, стр. 318.
432. Schenkel M. und W. Schottky. Über die Beteiligung des metallenen Gehäuses an den Einflüßvorgängen in Grossgleichrichtern. Wiss. Veröf. a. d. Siemens-Konzern, Bd. 2, 1922, 252. Ausführ. Bericht: ETZ, Bd. 44, N. 41, 1923, 923.
433. Müller G. W. Der neue 250-Amp.-Gleichrichter. AEG-Mitt., N. 5/6, 1922.
434. Kramer Ch. Die Umformung von Drehstrom in Gleichstrom. II. Die Umformung durch Quecksilberdampfgleichrichter. ETZ, Bd. 43, N. 4, 1922, 107. Disk.: N. 4, 126, N. 12, 401.
435. Der Argonalggleichrichter. ETZ, Bd. 43, N. 27, 1922, 921.
436. Eppen Ferd. Über Gleichrichter für funktelegraph. Schnellempfang. Jahrb. d. d. T. u. T., Bd. 20, N. 3, 1922, 173.
437. Borowik S. Der Lichtbogen als Gleichrichter. Phys. Z., Bd. 23, 1922, N. 18, 362.
438. Morrison R. L. High-power mercury arc rectifier. Electr. Rev., vol. 90, 1922, 353; 888; 424.
439. Jotte Ch. Les redresseurs à vapeur de mercure avec considération particulière du courant inverse. R. G. E., vol. 9, N. 9, 1922, 322.
440. Вербицкий М. Высоковольтные выпрямители для радиопередачи. Т. и Т. б. п., т. 4, № 18, 1923, стр. 33.
441. Pflieger-Haertel H. Zur Theorie des Gleichrichters. Die Konstruktion der genauen Strom- und Spannungskurven für Mehrphasenquecksilberdampfanlagen. Wiss. Veröf. a. d. Siemens-Konzern, Bd. 3, 1923, 61.
442. Müller G. W. Quecksilberdampfgleichrichter für elektrische Bahnen. AEG-Mitt., N. 11/12, 1923. Ref.: ETZ, Bd. 45, N. 25, 1924, 661.
443. Güntherschulze A. Die Zündspannung der Quecksilbergleichrichter. Arch. f. Elektrot., Bd. 12, N. 2, 1923, 121. Ref.: ETZ, Bd. 44, N. 28, 1923, 667.
444. Krüger L. P. Der Einfluss eines Quecksilberdampfgleichrichters auf den Leistungsfaktor des Netzes. ETZ, Bd. 44, N. 13, 1923, 286.

445. Jungmichl H. Primäre Stromkurvenform und Leistungsfaktoren bei Grossgleichrichteranlagen. E. u. M., Bd. 41, 1923, 57.
446. Odermatt A. Der Grossgleichrichter. E. u. M., Bd. 41, N. 9, 1923, 137.
447. Sabulka J. Zur Entwicklung des Quecksilberdampfgleichrichters. E. u. M., Bd. 41, 1923, 246.
448. Rothenberger A. Über das Zu- und Abschalten von Quecksilberdampfgleichrichtern. Siemens-Z., Bd. 3, N. 5, 1923, 234.
449. Morrison R. L. The conversion from alternating to direct current by means of mercury arc rectifiers. Electrician, vol. 91, N. 2366, 1923, 301.
450. Morrison R. L. Mercury arc rectifier. Engineering, 1923, 507; 543.
451. Белявский А. Ртутные выпрямители на большие силы тока (с металлическими цилиндрами). Т. и Т. 6. п., т. 5, № 23, 1924, стр. 2.
452. Кутушев А. Радиофонирование выпрямленным током. Т. и Т. 6. п., т. 5, № 28, 1924, стр. 411.
453. Котомин А. Ртутные выпрямители больших мощностей. Электричество, 1924, № 12, стр. 600.
454. Müller G. W. Quecksilberdampfgleichrichter. Ihre Wirkungsweise, Verwendungsmöglichkeiten, Wirtschaftlichkeit und Aufbau. Berlin, Druck. u. Verl. Norden, 1924.
455. Müller G. W. Der Wirkungsgrad der Grossgleichrichter und seine Beeinflussung durch die Kühlung. AEG-Mitt., N. 7, 1924, 201.
456. Lassen Hans. Experimentelle Untersuchungen über das Auftreten von Überspannungen in Stromkreisen mit Quecksilberdampfgleichrichter. Arch. f. Elektrot., Bd. 13, N. 4, 1924, 211. Ref.: ETZ, Bd. 46, N. 12, 1925, 428.
457. Krijger L. P. Die Sechsstasenschaltung des Quecksilberdampfgleichrichters. Arch. f. Elektrot., Bd. 13, N. 6, 1924, 441. Erwid.: F. Kleeberg u. L. Krijger. Bd. 15, N. 1, 1925, 41.
458. Dallenbach W. und E. Gerecke. Die Strom- und Spannungsverhältnisse der Grossgleichrichter. Arch. f. Elektrot., Bd. 14, N. 2, 1924, 171. Ferner: Bd. 15, N. 5, 1926, 490. Ref.: ETZ, Bd. 46, N. 5, 1925, 161.
459. Hellmuth. Spannungsabfall und Minimalstromstärke des Argongleichrichters. ETZ, Bd. 45, 1924, 579.
460. Müller G. W. Der Leistungsfaktor der Quecksilberdampfgleichrichter. ETZ, Bd. 45, N. 24, 1924, 624.
461. Taeger W. Der Einfluss der Gleichstrom-Drosselspule auf den Leistungsfaktor des Wechselstromes beim Quecksilberdampfgleichrichter. ETZ, Bd. 45, N. 29, 1924, 774.
462. Güntherschulze A. Die physikalischen Vorgänge im Quecksilberdampfgleichrichter. Z. f. techn. Phys., Bd. 5, N. 2, 1924, 33; Helios, Bd. 30, 1924, 17.
463. Güntherschulze A. Überspannungen an Quecksilberdampfgleichrichtern und ihre Ursache. Z. f. techn. Phys., Bd. 5, N. 4, 1924, 132. Ref.: ETZ, Bd. 48, N. 4, 1927, 112.
464. Prince D. C. Mercury arc rectifiers. Journ. A. I. E. E., vol. 43, 1924, 1021.
465. Demontvignier M. Méthode générale de calcul des redresseurs à vapeur de mercure. R. G. E., vol. 15, 1924, 493.
466. Demontvignier M. Quelques propriétés des redresseurs à vapeur de mercure. R. G. E., vol. 16, 1924, 506.
467. Dunoyer L. et P. Toulon. Sur une propriété remarquable de la colonne positive de l'arc au mercure. Journ. de Phys. (6), vol. 5, N. 7, 1924, 104 (Bull. Soc. Fr. de Phys., N. 205); Comptes Rendus, vol. 179, N. 3, 1924, 148; vol. 179, N. 7, 1924, 386; vol. 179, N. 9, 1924, 461.
468. Dunoyer L. et P. Toulon. Sur une propriété remarquable de la colonne positive de l'arc au mercure. Relais à arc de grande puissance. Journ. de Phys. (6), vol. 5, 1924, N. 9, 257; N. 10, 289.
469. Крапивин В. Производство ртутных выпрямителей большой мощности на заводе „Электросила“. Электричество, 1925, № 10, стр. 625.
470. Müller Kurt Emil. Der Quecksilberdampfgleichrichter. I. Theoretische Grundlagen. Berlin, J. Springer, 1925.
471. Güntherschulze A. Die physikalischen Grundlagen der Quecksilberdampfgleichrichter. AEG-Mitt., 1925, 96.
472. Norden K. Der Glaskörperersatz in Gleichrichteranlagen. AEG-Mitt., N. 11, 1925. Ref.: ETZ, Bd. 47, N. 4, 1926, 110.
473. Kern E. Der Parallelbetrieb von Quecksilberdampf-grossgleichrichtern unter sich und mit rotierenden Umformern. BBC-Mitt. Bd. 12, N. 6, 1925, 119. Ref.: ETZ, Bd. 48, N. 2, 1927, 50.
474. Krijger L. P. Die Messung der Blindleistung beim Quecksilberdampfgleichrichter. ETZ, Bd. 46, 1925, 48.

475. Hellmuth. Zur Berechnung von Transformatoren für Quecksilberdampf- und Argon-Gleichrichter. ETZ, Bd. 46, N. 13, 1925, 458. Erwid.: H. Nielsen, F. H. Hellmuth. ETZ, Bd. 46, N. 23, 867.
476. Faye-Hansen K. Primäre Stromkurvenform und Leistungsfaktoren bei Gleichrichtern. ETZ, Bd. 46, N. 30, 1925, 1104.
477. Schenkel M. Der Blindleistungsverbrauch von Gleichrichtern und seine Messung. ETZ, Bd. 46, 1925, 1369; 1399.
478. Wagner R. Rotierender Umformer oder Gleichrichter? Helios, Bd. 31, 1925, 545.
479. Dallenbach W., E. Gerecke und E. Stoll. Vorgänge an negativ geladenen Sonden und an Teilchen, die in Gasentladungen suspendiert sind. Phys. Z., Bd. 26, 1925, N. 1, 10; Nachtrag.: N. 4, 237.
480. Selbsttätige Ladegleichrichter für Elektrokarrenbatterien. Siemens-Z., Bd. 5, N. 11, 1925, 495.
481. Fleming J. A. Mercury arc rectifier and mercury vapour lamps. London, 1925.
482. Rogers G. Automatic and semi-automatic mercury-vapour rectifier substations. Journ. I. E. E., vol. 63, N. 338, 1925, 157; Disc.: N. 341, 473.
483. Giroz H. La chute de tension inductive des redresseurs à vapeur de mercure. R. G. E., vol. 17, 1925, N. 7, 253; N. 8, 303. Ref.: ETZ, Bd. 47, N. 22, 1926, 651.
484. Blanchard André. Redressement des courants alternatifs. R. G. E., vol. 17, N. 8, 1925, 295.
485. Güntherschulze A. Technische Quecksilberdampfgleichrichter. Handbuch d. Physik. Hrg. v. Geiger und Scheel, Berlin, J. Springer, Bd. 17, 1926, 307—335.
486. Müller K. Eine elementare Gleichung für den pulsierenden Gleichstrom des Quecksilberdampfgleichrichters. Arch. f. Elektrot., Bd. 16, N. 2, 1926, 113. Ref.: ETZ, Bd. 48, N. 10, 1927, 328.
487. Seitz O. Entlüftungseinrichtung für Quecksilberdampfgrossgleichrichter. BBC-Mitt., 1926, 175.
488. Gaudenzi A. Direktzeigende Vakuummessvorrichtung für Quecksilberdampfgrossgleichrichter. BBC-Mitt., 1926, 224. Ref.: E. u. M., Bd. 45, N. 5, 1927, 96; ETZ, Bd. 48, N. 32, 1927, 1153.
489. Seitz O. Die Kühlung von Quecksilberdampfgleichrichtern. BBC-Mitt., Bd. 13, N. 12, 1926, 283. Ref.: E. u. M., Bd. 45, N. 15, 1927, 305; ETZ, Bd. 48, N. 21, 1927, 731.
490. Norden K. Die Technik glaselektrischer Vakuumapparate. ETZ, Bd. 47, N. 8, 1926, 212.
491. Müller G. W. Die Diagramme des Quecksilberdampfgleichrichters. ETZ, Bd. 47, 1926, 328.
492. Partzsch A. Neuerungen an Grossgleichrichtern. ETZ, Bd. 47, 1926, 1056.
493. Hellmuth. Der Einfluss der Wechselstromnetzerdung auf Gleichrichter mit Transformatoren in Sparwicklung. Helios, Bd. 32, 1926, 113.
494. Jungnickel Heinrich. Zur Stromwandlerfrage in Gleichrichteranlagen. Siemens-Z., Bd. 6, N. 8, 1926, 380.
495. Kleist F. v. Zündung und Erregung von Grossgleichrichtern. Siemens-Z., Bd. 6, N. 12, 1926, 625.
496. Prince D. C. Mercury arc rectifiers. Trans. A. I. E. E., vol. 45, 1926, 998. Ty же работу см.: Journ. A. I. E. E., vol. 45, N. 11, 1926, 1087.
497. Prince D. C. Rectifier voltage control. Trans. A. I. E. E., vol. 45, 1926, 688. Ty же работу см.: Journ. A. I. E. E., vol. 45, N. 7, 1926, 630.
498. Marti O. K. The rectification of alternating currents with steel-enclosed mercury arc power rectifiers and their auxiliary devices. Trans. A. I. E. E., vol. 45, 1926, 668. Ty же работу см.: Journ. A. I. E. E., vol. 45, N. 9, 1926, 832.
499. Giroz H. La transformation statique du courant continu en courant alternatif. Bull. Soc. Franc. El., vol. 6, 1926, 1014.
500. Белявский А. Ртутные выпрямители переменного тока. Ростов н/Д, Сев.-Кавказск. ассоциация научно-исследовательск. институтов, 1927.
501. Курбатов С. Ртутные выпрямители. М., Гиз., 1927.
502. Вологдин В. Высоковольтный ртутный выпрямитель при работе его на ламповый передатчик. Научно-техн. сборн., т. 1, № 1, 1927, стр. 10.
503. Вологдин В. Ртутные выпрямительные устройства для питания радиотелефонных передатчиков. Т. м. Т. б. п., т. 8, № 2 (41), 1927, стр. 193.
504. Müller G. W. Quecksilberdampfglasgleichrichter. Ihre Wirkungsweise, Verwendungsmöglichkeiten, Wirtschaftlichkeit und Aufbau. 2 Aufl., Berlin, Dr. u. Verl. Norden, 1927.
505. Hammerström R. Kleine und mittlere Quecksilberdampfgleichrichter. Berlin, A. Seydel, 1927.
506. Just. Gleichrichter (Sammlung Götschen). 1927.

507. Jungmichl H. Elektrische Gleichrichter. Handbuch d. Elektr. und d. Magnet. Leipzig, J. A. Barth, Bd. 5, Lief. 2, 1927, 583-620.
508. Lübecke E. Über die Beeinflussung von Wandströmen in Quecksilberdampfentladung. Wiss. Veröff. a. d. Siemens Konzern, Bd. 5, 1927, 182.
509. Plan A. Die automatische Zündung der Quecksilberdampfgleichrichter. AEG-Mitt., 1927, 130.
510. Grossgleichrichter für 10 600 V. AEG-Mitt., 1927, 341.
511. Schuchmann H. Das Schalten grosser Leistungen mit Quecksilberdampfzröhren in der drahtlosen Telegraphie. ENT, Bd. 4, N. 9, 1927, 398.
512. Dallenbach W. Messungen des Rückstromes von Quecksilberdampfgleichrichtern. ETZ, Bd. 48, 1927, 1032.
513. Vidmar M. Der einphasige, zusätzliche Kraftfluss des dreiphasigen Transformators. E. u. M., Bd. 45, N. 5, 1927, 81.
514. Jungmichl H. Der Stromwandler im Anodenkreis von Gleichrichtern. E. u. M., Bd. 45, N. 21, 1927, 423.
515. Bettz W. Beitrag zur Messung der Energie im Anodenstromkreis von Quecksilberdampfgleichrichtern. E. u. M., Bd. 45, N. 45, 1927, 921.
516. Jungmichl H. und J. Issendorf. Elektrische Vakuummeseinrichtung für Grossgleichrichter. Siemens-Z., Bd. 7, N. 12, 1927, 829.
517. Schuchmann H. Die Anwendung der Quecksilberdampfzröhre als Schaltorgan. Z. f. techn. Phys., Bd. 8, N. 11, 1927, 489.
518. Prince D. Ch. and F. B. Vogdes. Principles of mercury arc rectifiers and their circuits. New-York, McGraw-Hill Book Co., 1927.
519. Shand E. Mercury arc rectifier characteristics. Electric Journ., vol. 24, N. 10, 1927, 486.
520. Reagan M. E. Automatic switching control for mercury arc rectifiers. Electric Journ., vol. 24, N. 10, 1927, 496.
521. Prince D. Mercury arc rectifier phenomena. Trans. A. I. E. E., vol. 46, 1927, 1064.
522. Мартин О. К. и Н. Винograd. Mercury arc power rectifier. Trans. A. I. E. E., vol. 46, 1927, 437. Disc. 445. Ты же работы см.: Journ. A. I. E. E., vol. 46, N. 8, 1927, 818.
523. Shand E. B. Steel-tank mercury arc rectifiers. A phase of their development in America. Journ. A. I. E. E., vol. 46, 1927, 597. Disc.: Trans. A. I. E. E., vol. 46, 1927, 445.
524. Butcher C. A. Application of mercury arc power rectifiers. Journ. A. I. E. E., vol. 46, 1927, 446. Disc.: Trans. A. I. E. E., vol. 46, 1927, 445.
525. Крапивин В. Ртутные выпрямители. СЭТ, Лр., Кубуч, 1928, т. 1, отд. 6, §§ 17-23, стр. 22-68.
526. Нитусов Е. Выпрямители в технике сильных токов. Техн. запикл. М., „Сов. запикл.“, т. 4, 1928, стр. 693-703.
527. Вологдин В. Ртутный выпрямитель высокого напряжения. Т. и Т. б. п., т. 9, № 50, 1928, стр. 587.
528. Вологдин В. Высоковольтный ртутный выпрямитель. Электросвязь, 1928, № 5 стр. 7.
529. Кургушев А. Схемы многофазного выпрямления. Т. и Т. б. п., т. 9, № 50, 1928 стр. 556.
530. Potthoff K. Zur Theorie des Quecksilberdampfgleichrichters. Arch. f. Elektrot., Bd. 19, N. 3, 1928, 301. Ref.: ETZ, Bd. 49, N. 15, 1928, 579.
531. Heinrich K. Störungen im Rundfunkempfang durch Quecksilbergleichrichter. ETZ, Bd. 49, N. 35, 1928, 1296.
532. Menger W. Hochvakuummeseinrichtung für Grossgleichrichter. ETZ, Bd. 49, N. 41, 1928, 1512.
533. Tenzer G. Oszillographische Untersuchungen an Gleichrichtern. E. u. M., Bd. 46, N. 38, 1928. Die Radiotechnik, Bd. 5, N. 9, 1928, 84.
534. Schenkel M. Die Gleichrichtung von Einphasen-Wechselstrom der Frequenz 16 $\frac{1}{2}$. Siemens-Z., Bd. 8, N. 3, 1928, 155.
535. Siemens Alfred. Die Gummidichtung des Quecksilberdampf-grossgleichrichters. Siemens-Z., Bd. 8, N. 5, 1928, 316. Ref.: ETZ, Bd. 50, N. 2, 1929, 60.
536. Loog C. Neue Zündvorrichtungen für Quecksilberdampfgleichrichter. T. F. T., Bd. 17, N. 7, 1928, 199.
537. Smede L. High-voltage mercury arc rectifiers. Electric Journ., vol. 25, N. 8, 1928, 403.
538. Smede L. Automatic vacuum gauges. Electric Journ., vol. 25, N. 9, 1928, 437. Ref.: ETZ, Bd. 50, N. 49, 1929, 1782.

539. Seeley H. T. Automatic control for mercury-arc rectifiers. Gen. El. Rev., vol. 31, N. 10, 1928, 537.
540. Meyer Jean. Etude oscillographique de la marche en parallèle des commutatrices et des redresseurs à vapeur de mercure. Journ. de Phys. (6), vol. 9, N. 2, 1928, 29 S. (Bull. Soc. Fr. de Phys., N. 257).
541. Альбар М. Ртутные выпрямители большой мощности. М., Московск. высш. техн. у-ще, 1929.
542. Володин В. Высоковольтные ртутные выпрямители. М., Н. К. П. Т., 1929.
543. Дзюлабаха В., Э. Герекке, М. Демонвилье. Ртутные выпрямители. Пер. Е. Семичева и Е. Чернышевой. Под ред. П. Калантарова. Сб. ст., Лг., Кубуч, 1929.
544. Михелис Я. Внешняя характеристика ртутных выпрямителей. Извест. ГЭТ, т. 3, № 1, 1929, стр. 11.
545. Первые установки со ртутными выпрямителями завода „Электросила“. Извест. ГЭТ, т. 3, № 1, 1929, стр. 15.
546. Михелис Я. Обратное зажигание ртутных выпрямителей и методы борьбы с ним. Извест. ГЭТ, т. 3, № 7/8, 1929, стр. 125.
547. Müller-Lübeck Kurt E. Der Quecksilberdampfgleichrichter. II. Konstruktive Grundlagen. Berlin, J. Springer, 1929.
548. Schellenberger K. Glaskörper für Gleichrichter. AEG-Mitt., N. 3, 1929, 83.
549. Gramisch O. Automatische Akkumulatorenladung mittels Gleichrichtern. E. u. M., Bd. 47, N. 10, 1929, 201.
550. Issendorff J. v. Neuere Untersuchungen über das betriebmäßige Verhalten von Quecksilberdampfgleichrichtern. ETZ, Bd. 50, N. 30, 1929, 1079. Bespr.: 1099. Auszugweise Wiedergabe des Vortrages: E. u. M., Bd. 47, N. 17, 1929, 353.
551. Bernbach W. Vakuummeter für Grossgleichrichter. Helios, Fach-Z. f. Elektrot., Bd. 35, N. 34, 1929, 322.
552. Hauffe G. Augenblicksbilder vom Quecksilberdampfgleichrichter. Z. f. techn. Phys., Bd. 10, N. 1, 1929, 23.
553. Liston J. Some developments in the electric industry during 1928. Rectifier transformers. G. E. R., vol. 32, N. 1, 1929, 44.
554. Hoffmann D. C. Automatic switching equipment for 1500 volt mercury-arc rectifier. G. E. R., vol. 32, N. 9, 1929, 466.
555. Крапивин В. Ртутные выпрямители. Физика и производство, 1930, № 3, стр. 27.
556. Über die Verwendung von Hochspannungs-Quecksilbergleichrichtern zum Speisen der Röhrenden. Leningrad, „Elektrosvaz“, 1930.
557. Partsch A. Hochstromgleichrichter. AEG-Mitt. N. 3, 1930, 178.
558. Rauber G. Quecksilberdampfgleichrichter. AEG-Mitt., N. 3, 1930, 180.
559. Neuere Arbeiten der Brown-Boveri Forschungsabteilungen. BBC-Nachr., Bd. 17, N. 2, 1930, 87.
560. Orlich E. Gleichrichtung grosser Wechselstromleistungen. ETZ, Bd. 51, N. 4, 1930, 122.
561. Mertens F. Hochspannungs-Quecksilberdampfgleichrichter zur Speisung von Röhrenden. ETZ, Bd. 51, N. 9, 1930, 305.
562. Gramisch Otto. Entwicklung und gegenwärtiger Stand des Glasgleichrichterbaues. E. u. M., Bd. 48, N. 10, 1930, 213.
563. Steiner H. C. and H. T. Maser. Hot-cathode mercury-vapor rectifier tubes. Proc. I. R. E., vol. 18, N. 1, 1930, 67. Disc.: 84.
564. Read J. C. Mercury-arc rectifiers. Electr. Rev., vol. 106, N. 2727, 1930, 421.
565. Demontvignier Marcel. Les redresseurs à vapeur de mercure à haute tension continue. Application à l'alimentation des postes émetteurs de T. S. F. Onde Electr., vol. 9, N. 98, 1930, 45.
566. Prince D. and P. Vogdes. Raddrizzatori a vapore di mercurio. Milan, Ulrico Hoepli, 1930.

X. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ.

567. Keller F. Der Quecksilberdampfgleichrichter der Westinghouse Elektrizitätsgesellschaft in der Praxis. ETZ, Bd. 30, N. 49, 1909, 1180. Disc.: 1225.
568. Schäfer Béla B. Neuerungen im Bau von Metaldampfgleichrichtern und ihre Erprobung in der Praxis. ETZ, Bd. 33, N. 7, 1912, 1164.
569. Norden K. Die Entwicklung der Grossgleichrichter der AEG. ETZ, Bd. 34, N. 52, 1913, 1479. Erwid.: Q. Kruh, ETZ, Bd. 35, N. 9, 1914, 250.
570. Epstein J. Betriebsmessungen in einer Einphasenstrom-Gleichrichteranlage. ETZ, Bd. 34, N. 50, 1913, 1415.

571. Schäfer Béla B. Neue Einrichtungen mit Grossgleichrichtern. ETZ, Bd. 38, 1917, N. 7, 89; N. 8, 107. Ausf. Ref.: R. G. E., vol. 2, N. 15, 1917, 571.
572. Obach J. Die Grossgleichrichteranlage im städt. Elektrizitätswerk in Hirschberg in Schliesien. ETZ, Bd. 39, 1918, 414.
573. Schumacher R. Gleichrichteranlagen. AEG-Mitt., Bd. 17, 1921, 91.
574. Grossgleichrichter für 150 kW und 600 V (Brown-Boveri Co.). ETZ, Bd. 42, N. 22, 1921, 600.
575. Schenkel M. Grössere Glasgleichrichteranlagen. Siemens-Z., Bd. 1, N. 3, 1921, 65.
576. Grossgleichrichter für Gleichspannungen von 5000 V. BBC-Mitt., 1922, 195. Ref.: ETZ, Bd. 44, N. 37, 1923, 867.
577. Eppen F. Über Gleichrichter für funktetelegraphischen Schnellempfang. Jahrb. d. d. T. u. T., Bd. 20, N. 3, 1922, 173.
578. Weber. Über Quecksilbergrossgleichrichteranlagen. Mitt. V. El.-Werke, Bd. 21, 1922, 129.
579. Idelberger H. und M. Schenkel. Eine Grossgleichrichteranlage für Bahnbetrieb. Siemens-Z., Bd. 2, 1922, 271.
580. Müller G. W. Quecksilberdampfglasgleichrichter für elektrische Bahnen. AEG-Mitt., 1923, N. 11, 307; N. 12, 337.
581. Odermatt A. Gleichrichter und Gleichrichteranlagen. Bull. Schweiz. El.-V., Bd. 14, 1923, 657. Ref.: ETZ, Bd. 46, N. 18, 1925, 665.
582. Quecksilberglassgleichrichter für die Personen und Güter-Strassenbahn Meissen. ETZ, Bd. 44, N. 26, 1923, 618.
583. Krämer Ch. Die neuste Entwicklung der AEG-Grossgleichrichter. AEG-Mitt., N. 3, 1924, 53.
584. Walty W. Die Gleichrichterunterstationen der Compagnie des Chemins de Fer du Midi. BBC-Mitt., 1924, 191.
585. Barthélemy J. L'application des redresseurs à vapeur de mercure à la traction. La Sous-station de la Nation de la Compagnie du Chemin de Fer métropolitain de Paris. R. G. E., vol. 16, N. 12, 1924, 455.
586. Brynhildsen C. Hochspannungs-Gleichrichteranlagen. BBC-Mitt., Bd. 12, N. 2, 1925, 23. Ref.: ETZ, Bd. 47, N. 9, 1926, 277.
587. Brynhildsen C. Die Gleichrichteranlage Zweilütschinen der Berner Oberlandbahnen. BBC-Mitt., 1925, 214.
588. Quecksilbergleichrichter im Bahnbetrieb. ETZ, Bd. 46, N. 17, 1925, 624.
589. Zimmermann W. Eine Grossgleichrichteranlage im Hüttenwerksbetrieb. ETZ, Bd. 46, 1925, 1253.
590. Schenkel M. Der Blindleistungsverbrauch von Gleichrichteranlagen und seine Messung. ETZ, Bd. 46, N. 36, 1925, 1369. Erwid.: E. Kern und M. Schenkel. ETZ, Bd. 47, N. 34, 1926, 1005.
591. Zastrow A. und E. R. Benda. Einwirkungen von Gleichrichteranlagen auf Fernspregleitungen. ETZ, Bd. 46, 1925, 1478.
592. Schenkel M. Einige Besonderheiten aus dem Betrieb von Transformatoren in Gleichrichteranlagen. Siemens-Z., Bd. 5, N. 1, 1925, 1; N. 2, 1925, 84.
593. Rottsieper K. Der fahrbare AEG-Hochspannungs-Glühkathoden-Gleichrichter zur Prüfung verlegter Kabel. AEG-Mitt., 1926, 316.
594. Pascher A. Glasgleichrichterstationen in städtischen Netzen und die Möglichkeit ihrer Automatisierung. AEG-Mitt., 1926, 451.
595. Die Gleichrichteranlage der Überlandbahn Turin-Lanzo-Ceres. BBC-Mitt., 1926, 146.
596. Über eine neue Grossgleichrichtertypen. BBC-Mitt., 1926, 157.
597. Danz A. E. Die Bedienungslose Gleichrichter- und Einankerumformeranlage St. Léger des Chemins de Fer Electriques Veveysans. BBC-Mitt., 1926, 193.
598. Walty W. Bedienungslose Grossgleichrichteranlagen. BBC-Mitt., 1926, 241.
599. Blandin J. Die Bedienungslose Gleichrichteranlage Palais du Midi in Brüssel. BBC-Mitt., 1926, 259.
600. Quecksilberdampf-grossgleichrichter mit 8000-V Gleichspannung. BBC-Mitt., 1926, 293.
601. Schumacher R. Zur Frage der Betriebsbrauchbarkeit von Grossgleichrichteranlagen. ETZ, Bd. 47, 1926, N. 12, 354; N. 13, 388. Erwid.: Dr. Zimmermann, R. Schumacher. ETZ, Bd. 47, N. 33, 1926, 980.
602. Przygode. Die weitere Elektrisierung der Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen. ETZ, 47, Nr. 19, 1926, 548.
603. Breslauer, M. Blindleistung und Tarifgestaltung von Quecksilbergleichrichteranlagen. ETZ, Bd. 47, 1926, 926.
604. Partzsch A. Gleichrichteranlage der Forchbahn. ETZ, Bd. 47, 1926, 1029.

605. Partzsch A. Gleichrichteranlage der Berliner Nord-Südbahn. ETZ, Bd. 47, 1926, 1357.
606. Weissbach W. Ferngesteuerte Quecksilberdampfgleichrichterunterwerke in städtischen Licht- und Kraftnetzen. Siemens-Z., Bd. 6, N. 6, 1926, 281.
607. Niogret H. Alimentation des récepteurs radiotéléphoniques par courant alternatif. Onde Electr., vol. 5, N. 59, 1926, 602.
608. Müller G. W. Gleichrichter für Werkzeugmaschinenantriebe. AEG-Mitt., 1927, 270.
609. Rottsieper K. Der fahrbare AEG-Hochspannungs-Glühkathoden-Gleichrichter zur Prüfung verlegter Kabel. AEG-Mitt., 1927, 342.
610. Heilfarth R. Die Gleichrichteranlage des Elektrizitätswerkes Bonn. AEG-Mitt., 1927, 386.
611. Schellenberger. Bedienungslose Grossgleichrichteranlage. BBC-Mitt., 1927, 35.
612. Pletzsch. Die Stromversorgung der Berliner Stadt-Ring- und Vorortbahnen mit Quecksilberdampf-Gross-Gleichrichter. BBC-Mitt., 1927, 140.
613. Leithäuser G. Über die Beseitigung der Hochfrequenzstörungen, hervorgerufen durch einen Quecksilberdampfgleichrichter. ENT, Bd. 4, 1927, 434. Ty же работы см.: Mitt. Telegr.-techn. Reichsamt, Bd. 13, 1928, 229.
614. Fleischmann L. Der Blindleistungsverbrauch von Gleichrichteranlagen und seine Messung. ETZ, Bd. 48, N. 1, 1927, 12. Ref.: E. u. M., Bd. 45, N. 25, 1927, 511.
615. Cohn A. Versuche mit Schnellschaltern. ETZ, Bd. 48, N. 8, 1927, 233.
616. Weidlich. Die Gleichrichteranlage des Elektrizitätswerkes Blankenburg am Harz. ETZ, Bd. 48, N. 24, 1927, 825.
617. Spängler L. Die Wiener elektrische Stadtbahn. ETZ, Bd. 48, N. 39, 1927, 1397.
618. Haag L. Ein neuer Gleichstrom-Schnellschalter. ETZ, Bd. 48, 1927, 1727.
619. Heilfarth R. Die Gleichrichteranlage des Elektrizitätswerkes Bonn. E. u. M., Bd. 45, N. 36, 1927, 717.
620. Riedel K. Gleichrichterwerk Hermannplatz der Nord-Südbahn A.-G. Berlin. El. Bahnen, 1927, 25.
621. Hough E. L. Automatic control equipment for 1500-volt arc rectifier substations of the Chicago, South Shore and South Bend Railroad. G. E. R., vol. 30, N. 7, 1927, 345.
622. Comment un amateur peut obtenir l'alimentation de tension de plaque d'un poste d'émission à l'aide des courants alternatifs. QST Franç., N. 38, 1927, 50.
623. Planès-Py A. Une boîte d'alimentation à multiple usages. QST Franç., N. 38, 1927, 54.
624. Le redresseur de courant B. 8 pour l'alimentation de la tension-plaque. Bull. Soc. Fr. Radioélectr., Supplément „Radiola“, 1927, N. 5, R5, N. 6, 5.
625. Володин В. Мощное выпрямительное устройство со ртутными колбами. Электросвязь, 1928, № 7, стр. 31.
626. Jungmichl H. Die Saugdrosselspule in Grossgleichrichteranlagen. Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern, Bd. 6, 1928, 34.
627. Jordan H. Selbsttätiges Gleichrichterwerk Schützenhof der Hagener Vorortbahnen. AEG-Mitt., N. 9, 1928, 468.
628. Pascher A. Neue Gleichrichteranlage des Elektrizitätswerkes Rosswein (Sachsen). AEG-Mitt., N. 11, 1928, 566.
629. Gerecke E. Sechphasengleichrichteranlage mit Einphasentransformatoren. Arch. f. Elektrot., Bd. 19, N. 4, 1928, 449. Ref.: ETZ, Bd. 49, N. 30, 1928, 1122.
630. Nowag. Der Brown Boveri-Gleichrichter für die Berliner Stadt- und Ringbahn. BBC Nachr., Bd. 15, N. 3, 1928, 79.
631. Blandin. Spannungsregelung in Gleichrichteranlagen. BBC Nachr., Bd. 15, N. 6, 1928, 233. Ref.: E. u. M., Bd. 47, 1929, 625.
632. Bewerunge. Weitgehende verlustlose Drehzahlregelung von Gleichstrommotoren mit Quecksilberdampfgleichrichtern. BBC-Nachr., Bd. 15, N. 6, 1928, 252.
633. Besold H. Fortschritte im Schnellschalterbau. ETZ, Bd. 49, N. 5, 1928, 175.
634. Reichel W. Gleichstromversorgung der Deutschen Reichsbahn, insbesondere durch Gleichrichteranlagen. ETZ, Bd. 49, 1928, 903.
635. Jungmichl H. und R. Eichacker. Mehrphasiger Manteltransformator in Gleichrichteranlagen. Siemens-Z., Bd. 8, N. 7, 1928, 331. Ref.: E. u. M., Bd. 47, N. 6, 1929, 125.
636. Schleicher M. Die elektrische Fernbedienung von Unterstationen. Siemens-Z., Bd. 8, 1928, N. 4, 281; N. 5, 320.
637. Crouse George B. Development of a system of line power for radio. Proc. I. R. E., vol. 16, N. 8, 1928, 1133. Ref.: J. Zenneck, Jahrb. d. d. T. u. T., Bd. 34, N. 3, 1929, 118.
638. Antonino Caesar. Operation and performance of mercury arc rectifier on the Chicago North Shore and Milwaukee Railroad Company. Trans. A. I. E. E., vol. 47, N. 1, 1928, 228; Circ. 232. Ty же работы см.: Journ. A. I. E. E., vol. 47, N. 1, 1928, 3.
639. Daly Charles J. Effect of street railway mercury arc rectifiers on communication

circuits. Trans. A. I. E. E., vol. 47, N. 4, 1928, 1093; Disc.: 1096. Ту же работу см.: Journ. A. I. E. E., vol. 47, N. 7, 1928, 503.

640. Клячкин Л. Первые установки со ртутными выпрямителями запода „Электросила“. Извест. ГЭТ, т. 3, № 1, 1929, стр. 15.

641. Клячкин Л. Подстанции со ртутными выпрямителями в Ленинградском политехническом институте. Извест. ГЭТ, т. 3, № 7/8, 1929, стр. 130.

642. Каганов И. Выпрямители ГЭТа и их установка. Извест. ГЭТ, т. 3, № 7/8, 1929, стр. 133.

643. Выпрямительная установка и ртутные выпрямители на станции ВЦСПС. Электросвязь, 1929, № 12, стр. 9.

644. Schleusener N. Lebensdauer von Glaskörpern in Bahnleichrichteranlagen. AEG-Mitt., N. 1, 1929, 32.

645. Lütze O. Fährbare Glasgleichrichteranlagen, System Elektrizitätswerk Stuttgart. AEG-Mitt., N. 2, 1929, 45.

646. Höpp W. Neukonstruktionen grosser Glasgleichrichter. AEG-Mitt., N. 3, 1929, 75.

647. Krämer Ch. Der gegenwärtige Stand der AEG Eisen-Grossgleichrichter. AEG-Mitt., N. 3, 1929, 85.

648. Gleichrichterwerke für Licht und Kraft. AEG-Mitt., N. 3, 1929, 87.

649. Gleichrichterwerke für Bahnen. AEG-Mitt., N. 3, 1929, 95.

650. Müller G. W. und A. Schellenberger. Zweckmässige Ladung von Akkumulatoren-Batterien durch Gleichrichter. AEG-Mitt., N. 5, 1929, 360.

651. Glasgleichrichter für 1650 V Gleichstromspannung. AEG-Mitt., N. 11, 1929, 746.

652. Danz A. Die bedienungslosen Gleichrichterunterwerke der Niederländischen Eisenbahnen. BBC Nachr., Bd. 16, N. 1, 1929, 38.

653. Nowag. Die Schaltung der ferngesteuerten Brown Boveri-Gleichrichter für die Berliner Stadt- und Ringbahn. BBC-Nachr., Bd. 16, N. 2, 1929, 79.

654. Landsmann K. Die Fernsteuerung von Glasgleichrichteranlagen mit wenigen Steuerleitungen. BBC Nachr., Bd. 16, N. 5, 1929, 245.

655. Krämer Ch. Eine neue Zwölphasenschaltung von Transformatoren für Grossgleichrichter. ETZ, Bd. 50, N. 9, 1929, 303.

656. Neue Bauarten grosser Glasgleichrichter. ETZ, Bd. 50, N. 9, 1929, 313.

657. Orlich E. Die Frühjahrsausstellung im Hause der Elektrotechnik. (Neuerungen in Gleichrichterbau auf der Leipziger Messe.) ETZ, Bd. 50, N. 21, 1929, 738.

658. Ginzel E. Die „Apparatefabriken Creptow“ der AEG. (Prüfstand der Glasgleichrichter-Fabrik der AEG.) ETZ, Bd. 50, N. 24, 1929, 857.

659. Jungmichl H. Stromteiler in Sechssphasen-Gleichrichteranlagen. ETZ, Bd. 50, N. 35, 1929, 1257.

660. Kleist F. Baron. Stromteiler bei Gleichrichtern. ETZ, Bd. 50, N. 52, 1929, 1879.

661. Micheluzzi. Die Hochstromgleichrichter und die bedienungslos betriebenen Gleichrichter der Städtischen Elektrizitätswerke Wien. E. u. M., Bd. 47, N. 7, 1929, 129.

662. Nowag. Die Verwendung von Grossgleichrichtern für Elektrolyse. (34. Jahresversammlung des VDE in Aachen, 1929. Auszug v. W. v. Mangoldt.) E. u. M., Bd. 47, N. 49, 1929, 1085.

663. Jungmichl H. Gleichrichterfahrzeuge. (34. Jahresversammlung des VDE in Aachen, 1929. Auszug v. W. v. Mangoldt.) E. u. M., Bd. 47, N. 49, 1929, 1088.

664. Krämer Ch. Der gegenwärtige Stand der AEG-Eisen-Grossgleichrichter. Helios, Export-Z. f. Elektrot., Bd. 35, N. 9, 1929, 268.

665. Spoth J. Gleichrichter für Akkumulatorenladung. Helios, Fach-Z. f. Elektrot., Bd. 35, N. 37, 1929, 345.

666. Hermannspahn P. Hochfrequenz-Gleichrichteranlage mit automatischer Konstanthaltung der Gleichspannung. Jahrb. d. d. T. u. T., Bd. 33, N. 4, 1929, 121.

667. Eichacker R. Die Glättung der Gleichspannung in Gleichrichteranlagen. Siemens-Z., Bd. 9, N. 1, 1929, 39.

668. Hoffmann D. C. Automatic switching equipment for 1500-volt mercury arc rectifier. G. E. R., vol. 32, N. 9, 1929, 466. Ref.: E. u. M., Bd. 48, N. 14, 1930, 327.

669. Kaar I. J. 750 kW high-voltage rectifier. G. E. R., vol. 32, N. 9, 1929, 473. Ref.: E. u. M., Bd. 48, N. 9, 1930, 204.

670. Garret A. M. Automatic mercury rectifier substations in Chicago. Journ. A. I. E. E., vol. 48, N. 4, 1929, 301.

671. Sarsfield L. G. H. The electrical equipment of X-ray apparatus. Journ. I. E. E., vol. 67, N. 388, 1929, 437.

672. Haffner L. Les sous-stations de redresseurs à vapeur de mercure de la Société minière et métallurgique de Penarroya. R. G. E., vol. 26, N. 20, 1929, 797.

673. Политов В. Испытание ртутных выпрямителей на ленинградских трамвайных подстанциях. Электрич. станции, 1930, № 1, стр. 58.

674. Habersaat L. und W. Weber. Selbsttätige Bahn-Gleichrichteranlage Oberforsthaus der Städtischen Elektrizitätswerke Frankfurt a. Main. AEG-Mitt., N. 1, 1930, 2.
675. Pascher A. und G. Zink. Selbsttätiges Gleichrichterwerk München-Haidhausen. AEG-Mitt., N. 4, 1930, 299.
676. Nowag W. Die Brown Boveri-Gleichrichter zur Stromversorgung der Berliner Strassenbahn. BBC Nachr., Bd. 17, N. 1, 1930, 12.
677. Landsmann K. Glas-Gleichrichteranlagen zum selbsttätigen Laden von Akkumulatorenbatterien. BBC Nachr., Bd. 17, N. 1, 1930, 42.
678. Reichel W. Elektrische Stadtbahn von der Siemensschen Bahn 1879 zur Berliner Stadtbahn. ETZ, Bd. 51, N. 12, 1930, 423.
679. Kotschubey N. von. Eine fahrbare, bedienungslose Quecksilber-Grossgleichrichteranlage. ETZ, Bd. 51, N. 20, 1930, 697.
680. Dühne W. Stromversorgung der Strassenbahn Halle a/S insbesondere durch ferngesteuerte Gleichrichteranlagen. Siemens-Z., Bd. 10, N. 1, 1930, 49.
681. Tribbey F. O. A three-phase high-voltage rectifier. QST, vol. 14, N. 2, 1930, 37.
682. Rodimon C. C. Electrolytic condensers and a high-voltage rectifier. QST, vol. 14, N. 3, 1930, 31.
-

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ.

(Цифры указывают порядковые номера в систематическом указателе литературы).

Альбац М. 541.	Ball E. 235.
Белявский А. 45, 58, 399, 400, 413, 451, 500.	Balzer G. 157.
Бонч-Бруевич А. 306.	Banner E. 287.
Брагин А. 25.	Bareiss M. 331, 332, 380.
Вацлер А. 25.	Barré J. 300.
Вербницкий М. М. 440.	Barthélemy R. 124, 125, 585.
Вологдин В. 17, 502, 503, 527, 528, 542, 625.	Barton J. 352.
Герекке Е. 543.	Bauch R. 418.
Демонвилле 543.	Beck P. 268.
Далленбах В. 543.	Betz W. 81.
Икльз В. 34.	Benda E. 591.
Каганов И. 642.	Benhan W. 351.
Калантаров П. 431.	Bergholm C. 216.
Клячкин Л. 640, 641.	Bernbach W. 551.
Кобеко П. 90, 93.	Besold H. 633.
Котомин А. 453.	Best G. 345.
Крапивин В. 469, 525, 555	Betz W. 515.
Кугушев А. М. 452, 529.	Bewerunge 632.
Курбагов С. 501.	Blanchard A. 484.
Курчагов И. 90, 93.	Blandin J. 599, 631.
Лепешинская-Кракау В. 294	Blodgett K. 56.
Миткевич В. 144.	Borowik S. 437.
Михелис Я. 544, 546	Brachett Q. 406.
Нитусов Е. 526.	Brandenburger L. 376.
Политов В. 673.	Brandes H. 196.
Рубан А. 147, 148.	Brenzinger M. 107, 109
Селезнев А. 316.	Breslauer M. 122, 603.
Семенов Н. 19, 25.	Brown H. 373.
Синельников К. 93.	Bruyère 353.
Ситников М. 26.	Bruyne H. 183.
Слепня Л. 27.	Brynhildsen C. 586, 587.
Стахорский К. 330.	Buggisch H. 84, 256, 257.
Фортескью Ч. 18.	Busch H. 411.
Хараджа Ф. 143.	Bush V. 368.
Шапошников А. 20.	Butcher C. 524.
Шрейдер А. 276.	Butement A. 135.
André H. 186, 193, 243.	Cairns C. 119.
Antoniono C. 638.	Carman A. 157.
Archibald R. 133.	Cayrel J. 241, 242, 263.
Audubert R. 189, 275, 291.	Clarnfeld 424.
Austin L. 200.	Cockroft J. 68.
Baggally W. 325.	Coe R. 68.
Bairsto G. 158, 163.	Cohn A. 615.
Ball A. 235.	Colebrook F. 9, 10, 239, 240.
	Compton K. 87, 88, 89, 99.
	Crouse G. 637.
	Dacos F. 328.
	Dallenbach W. 458, 479, 512.

- Daly Ch. 639.
 Danz A. 597, 652.
 Demontvignier M. 113, 293, 465, 466, 565.
 Dent H. 346.
 Dessauer F. 107.
 Deutschmann W. 277, 279.
 Dinsdale A. 246.
 Dobias A. 194.
 Dowling J. 123.
 Dowsett H. 225.
 Doucet I. 190.
 Dubar L. 264, 274.
 Dühne W. 680.
 Dunoyer L. 467, 468.
 Dushman S. 55.
 Dyer H. 136.
 Eichacker L. 635, 667.
 Elliott J. 403.
 Elwell C. 342.
 Eppen F. 302, 436, 577.
 Epstein J. 570.
 Erickson C. 365.
 Ettenreich R. 217.
 Ewald J. 55.
 Falkenthal E. 114, 115.
 Faye-Hansen K. 476.
 Feitknecht W. 282, 298.
 Féry M. 188.
 Fichte 169.
 Fitch A. 176.
 Fleischmann L. 614.
 Fleming J. 481.
 Florisson C. 221.
 Flowers A. 205, 209.
 Fortescue C. 339.
 Frey F. 234.
 Fromy E. 347.
 Fry T. 39.
 Garratt G. 71, 375.
 Garret A. 670.
 Gaudenzi A. 488.
 Gehrts A. 337, 338.
 Geiger W. 80.
 Geiger P. 258, 259.
 Gerecke E. 458, 479, 629.
 Germershausen W. 7, 334, 362.
 Ginzler E. 658.
 Giroz H. 427, 483, 499.
 Goetz A. 79.
 Graffunder W. 295.
 Gramisch O. 549, 562.
 Greene C. 171.
 Grelnacher H. 36, 101, 212.
 Grisson 154.
 Groeneveld J. 83.
 Grondahl L. 247, 248, 258, 259.
 Guillet A. 254.
 Güntherschulze A. 1, 3, 6, 7, 12, 13, 28, 38, 40, 41, 42, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 59, 63, 64, 65, 66, 67, 73, 74, 76, 77, 78, 91, 92, 96, 141, 149, 150, 151, 152, 153, 155, 159, 160, 161, 162, 164, 172, 173, 174, 175, 180, 181, 392, 396, 409, 443, 462, 463, 471, 485.
 Haag L. 618.
 Habann E. 281.
 Habersaat L. 674.
 Haffner L. 672.
 Hahn K. 399.
 Hammerström R. 505.
 Harris J. 123.
 Hartmann J. 131, 139, 140, 141.
 Hartmann-Kempf 410.
 Hauffe G. 552.
 Hausrath H. 211.
 Hebb T. 37.
 Hechler W. 398, 402.
 Heinrich K. 531.
 Heid S. 301.
 Hellfarth R. 610, 619.
 Hellmuth 459, 475, 493.
 Hermanspann P. 112, 666.
 Hildebrand P. 117.
 Hoffmann D. 554, 668.
 Hoffmann G. 224, 227.
 Holler H. 8.
 Holtz W. 146.
 Höpfer 395.
 Höpp W. 429, 646.
 Hough E. 621.
 Hughes H. 344.
 Huizinga M. 219.
 Hull A. 102, 314, 315, 350, 359.
 Hunt A. 214.
 Idelberger H. 579.
 Ippisch K. 72, 245.
 Irion O. 270, 284.
 Issendorff J. 62, 516, 550.
 Jablczynski 169.
 Jackson R. 394.
 Jaeger W. 106, 415.
 James A. 70, 238.
 Jentzsch F. 31.
 Joffe A. 54.
 Jolley L. 23, 69.
 Jordan H. 627.
 Joss G. 43, 41.
 Jotte Ch. 439.
 Jungmichl H. 445, 494, 507, 514, 516, 626, 635, 659, 663.
 Just 506.
 Kaar I. J. 669.
 Kade F. 126.
 Kade H. 105.
 Kallmeyer F. 266.
 Kaneko S. 261.
 Keller F. 567.
 Keller S. 420.
 Kern E. 473.
 Kirschstein B. 95.
 Kleeberg F. 422.
 Kleist F. 495, 660.
 Kneser H. 369.
 Knipp Ch. 373.
 Knoll H. 319.
 Kost H. 280.
 Kotschubey N. 679.

Krämer Ch. 434, 583, 647, 655, 684.

Kramp L. 194.

Krüger L. 444, 457, 474.

Kronig R. 288.

Kuhlmann J. 352.

Landmann K. 654, 677.

Langmuir I. 33, 56, 57, 99.

Lassen H. 456.

Lebedinskaja O. 194.

Leblanc M. 289, 290, 310, 412.

Leimbach G. 208.

Leithäuser G. 613.

Leopold F. 255.

Lilienfeld J. 260.

Lindemann R. 174.

Liston J. 553.

Loewenherz A. 318.

Loog C. 536.

Lorenz E. 107.

Lübcke E. 86, 508.

Luchstinger F. 226.

Lütze O. 645.

McDowell L. 215.

McGregor M. 195.

McWellauer 324.

Marli O. 498, 522.

Marx E. 110.

Mathews H. 118.

Maxstadt F. 317.

Meikle G. 304.

Menger W. 532.

Mercer R. 158.

Merritt E. 236, 237.

Mertens F. 561.

Meserve W. 187.

Meyer F. 414.

Meyer J. 540.

Micheluzzi 661.

Mierdel G. 29.

Miller C. 212.

Mines R. 11.

Mitkiewicz W. 145.

Moll W. 249.

Morris-Airy H. 344.

Morrison R. 438, 449, 450.

Morse 158.

Moulin E. 309.

Müller 348.

Müller B. 358.

Müller C. 108.

Müller G. 433, 442, 454, 455, 460, 491, 504,

580, 608, 650.

Müller K. 111, 470, 486, 547.

Müller W. 358.

Nemoto C. 261.

Newman F. 184.

Nielsen H. 35, 421, 430.

Niethammer F. 22.

Nisgret H. 807.

Norden K. 320, 472, 490, 568.

Nowag W. 630, 653, 662, 676.

Obach J. 572.

Odermatt A. 448, 581.

Ogawa W. 261, 271, 272.

Orlich E. 560, 657.

Owen D. 343.

Papalexi N. 32.

Parsons C. 403.

Partzsch A. 492, 557, 604, 605.

Pascher A. 594, 628, 675.

Pearson S. 177.

Pélabon H. 250, 251, 252, 253, 292, 299.

Pflieger-Haertel H. 441.

Pfund A. 213.

Pickard G. 201.

Picken W. 340.

Pierce G. 199, 202, 203, 204.

Pian A. 509.

Planès-Py A. 623.

Pflitzsch 612.

Pohlhausen K. 363.

Pol B. van der 83.

Polak J. 389.

Posthumus K. 83.

Potthoff K. 530.

Precht J. 232.

Prince D. 5, 61, 464, 496, 497, 518, 521, 568

Przygode 602.

Quintin M. 291.

Rauber G. 558.

Read J. 564.

Reagan M. 520.

Recklinghausen M. 335.

Redmond M. 104.

Regler F. 269.

Reichel W. 634, 678.

Reissaus G. 267.

Retschinsky T. 386.

Richardson O. 60.

Riedel K. 620.

Riemenschneider K. 2, 338.

Rinkel R. 210.

Robinson E. 182, 185.

Rodlmon C. 682.

Rogers G. 482.

Roth H. 21.

Rothenberger A. 448.

Rother F. 228, 244.

Rottmann G. 335.

Rottseper K. 593, 609.

Russel R. 305.

Sagerdote G. 302.

Sahulka J. 391, 447.

Santini D. 286.

Sarsfield L. 671.

Sayre L. 328.

Shorgi U. 168.

Schäler B. 127, 397, 401, 405, 407, 419, 568,

571.

Schaper F. 192.

Schaposchnikoff A. 386.

Schellenberger A. 548, 611, 650.

Schenkel M. 103, 432, 477, 534, 575, 579, 590,

592.

Schering H. 207.

Schleede A. 84, 256, 257.

Schleicher M. 636.
 Schleusener H. 644.
 Schmick H. 85.
 Schmidt A. 812, 313.
 Schottky W. 21, 47, 230, 277, 279, 432.
 Schrodt J. 8.
 Schröter F. 366, 370, 371, 372.
 Schuchmann H. 511, 517.
 Schüller L. 121.
 Schumacher R. 573, 601.
 Scott-Taggart J. 307.
 Scroggie M. 130.
 Searling H. 104.
 Seeley H. 539.
 Seeltger R. 16, 29, 75.
 Selbt G. 377, 379.
 Seltz O. 487, 489.
 Shaw A. 94.
 Shand E. 519, 523.
 Shearing G. 322, 344.
 Shuddemagen 156.
 Siebel K. 165.
 Siegler T. 265.
 Siemens A. 535.
 Simmonds E. 132.
 Simon H. 21, 333, 380.
 Skaupy F. 82.
 Skeet T. 327.
 Sleplan J. 273.
 Smede L. 537, 538.
 Smith C. 368.
 Smith I. 286.
 Soulier A. 30, 126.
 Späugler L. 617.
 Spohn J. 665.
 Strachan J. 231.
 Stark J. 386.
 Steenbeck M. 97, 98.
 Stein P. 116.
 Steiner H. 563.
 Steinmetz Ch. 4, 100, 387.
 Steinwehr H. 106.
 Stoll E. 479.
 Stransky J. 233.
 Strelitz F. 178, 179, 220.
 Strigel R. 356, 357.
 Stüber 355.
 Suicjkin W. 218.
 Sutton H. 208.

Sutton J. 323.
 Szekely A. 222, 311.
 Taeger W. 461.
 Tank F. 348.
 Tellert F. 142.
 Tenzer G. 533.
 Teucke K. 382.
 Thomas C. 260.
 Thomson G. 24.
 Thomson J. 24.
 Toulon P. 383, 467.
 Tribbey F. 681.
 Tschudy W. 404, 408, 416, 417.
 Tunkel M. 138.
 Turner L. 309.
 Tyacke J. 68.
 Vaillant L. 177.
 Vidmar M. 513.
 Voegel W. 197.
 Vogdes F. 518, 566.
 Voorhis C., Van 89.
 Voorhoeve N. 349.
 Wagner R. 478.
 Walker M. 68.
 Walter L. 170.
 Walty W. 584, 598.
 Weber 578.
 Weber W. 674.
 Weidlich 616.
 Weissbach W. 606.
 Welter E. 2.
 Wertheim-Salomonsohn J. 198.
 Wesely 220.
 Whittemore L. 214.
 Wick F. 215.
 Winograd H. 522.
 Winter W. 166.
 Wolcott E. 365.
 Wolf H. 118.
 Wolff W. 425.
 Woodhull S. 129.
 Wuest A. 283.
 Zahn H. 229.
 Zastrow A. 591.
 Zenneck J. 167, 223.
 Zimmermann W. 589.
 Zink G. 675.

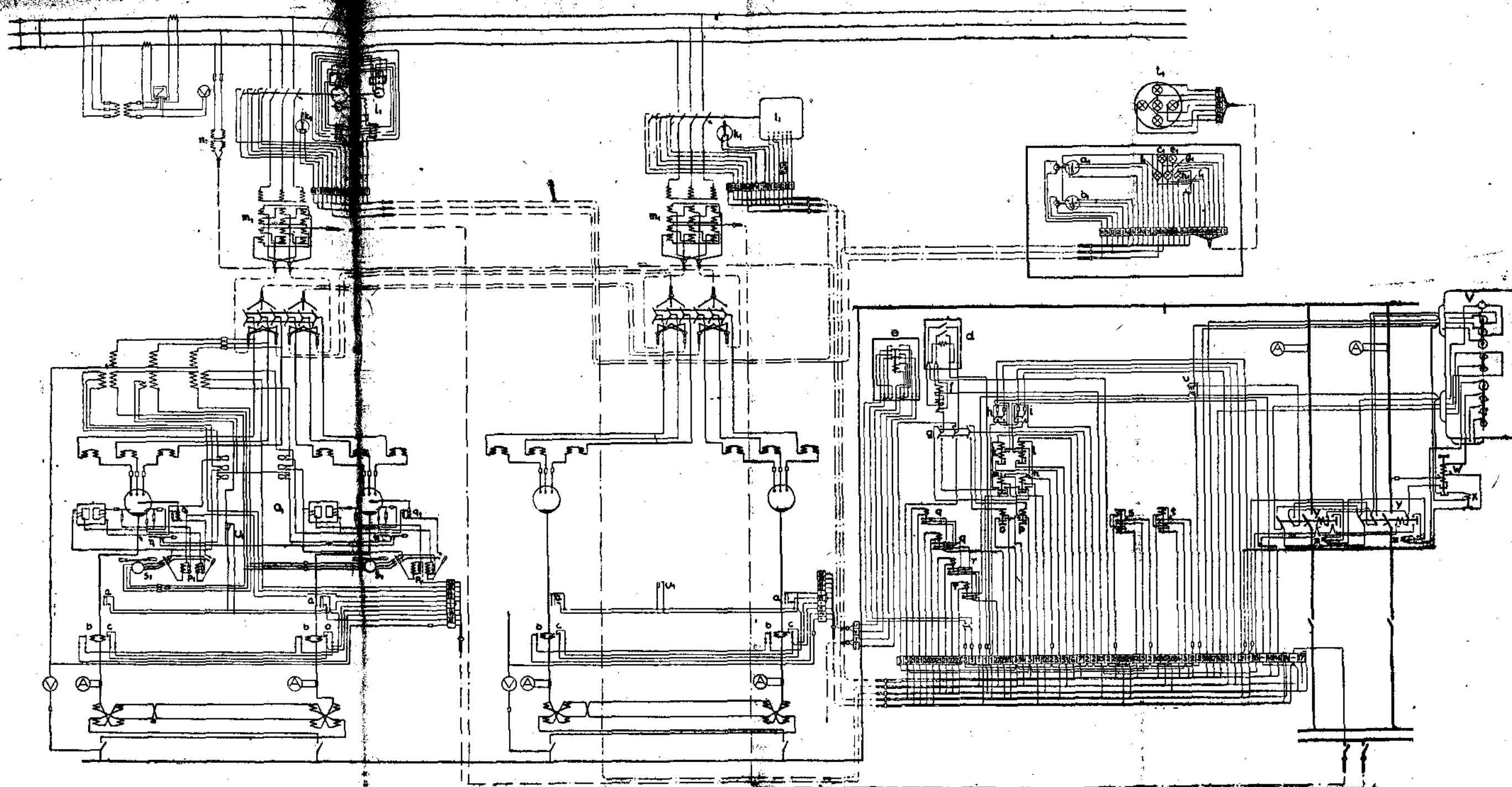


Рис. 118. Схема автоматического выпрямительного устройства фирмы ВВС.

- а. Термическое максимальное реле.
 б. Отключающее реле.
 в. Подключающее реле.
 г. Включающее часы (реле времени).
 д. Переключающее реле, двухполюсное, для переключения цепей вспомогательного тока от вспомогательного трансформатора на трехфазную сеть низкого напряжения.
 е. Запорное реле.
 ж. Селективный выключатель.
 з. Выключатель масляника 2.
 и. Выключатель масляника 1.
 л. Управляющее реле выключения масляника 2.
 м. Управляющее реле выключения масляника 1.
 н. Реле времени для подключения 2 группы.
 о. Реле времени для подключения 1 группы.
 п. Реле времени для отключения 2 группы.
 р. Реле времени для отключения 1 группы.
 с. Реле возбуждения 2 группы.
 т. Реле возбуждения 1 группы.

- а. Сигнальное вспомогательное реле для 2 группы.
 б. Сигнальное вспомогательное реле для 1 группы.
 в. Малый трансформатор 220/80 вольт.
 г. Включающий аппарат для автоматов постоянного тока.
 д. Управляющее реле с выдержкой времени для автоматов постоянного тока.
 е. Вспомогательное реле переменного тока.
 ж. Включающий магнит линейного автомата.
 з. Магнит нулевого напряжения линейного автомата.

а 1 до 11 аппараты в обмурованной камере.

- а₁. Контактный механизм с вспомогательным контактом для масляника 2.
 б₁. То же для масляника 1.
 в₁. Сигнальная лампа для указания дефектов одной из стальных колб группы 2.
 г₁. Сигнальная лампа для указания выключения масляника группы 2 посредством термического реле либо максимального реле масляника.
 д₁. Сигнальная лампа для указания дефектов одной из стальных колб группы 1.
 е₁. Сигнальная лампа для указания выключения масляника группы 1 посредством термического реле либо максимального реле масляника.

- а. Сигнальная лампа для указания закрытия линейного автомата.
 б. Нажимная кнопка для освобождения запертого линейного автомата.
 в. Контактная коробка максимального реле масляника.
 г. Моторный дистанционный привод масляника.
 д. Трансформатор высокого напряжения.
 е. Вспомогательный трансформатор.
 ж. Стеклоплатный ртутный выпрямитель.
 з. Двойное реле.
 и. Наклоняющий соленоид.
 л. Заслонка вентиляционного дутья.
 м. Охлаждающий вентилятор.
 н. Сигнальная лампа на наружной стене здания.
 о. Термическое реле.