

537
K-12

И. Л. НАГАНОВ

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА



24453

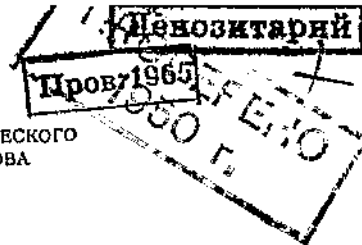
ОБТИ НКТП СССР 1937

537 621.1.11

K12

И. Л. КАГАНОВ

ДОЦЕНТ МОСКОВСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА им. В. М. МОЛОТОВА



ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА

Утверждено ГУУЗ НКТП
в качестве учебника для энер-
гетических вузов

Цена 4 р. 50 к. Пер. 1. р. 25 к.

71409347

~~24453~~

ПРОВЕРЕНО
1935 г.



Подписано

ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1937 ЛЕНИНГРАД

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

Индекс 99-55-5-2

Прот. ТКК № 82 от 5/1-37 г.

Редактор инж. К. М. Поливанов
Технич. редактор В. Н. Шипов

ПРЕДИСЛОВИЕ

В электротехнике одной из передовых областей является несомненно ионная техника, получающая все большее и большее применение в самых различных отраслях энергохозяйства. Особенно велико применение ионных приборов в качестве преобразователей тока для электрифицируемого транспорта, в радиотехнике, в электрохимической промышленности, для электросварки, для сигнальных и измерительных целей и т. д. Широкое развитие ионной техники предъявляет значительные требования и ко втузам, готовящим кадры энергетиков.

Сейчас почти все энергетические втузы нашего Союза имеют в качестве учебной дисциплины „Электронные и ионные преобразователи тока“ (или аналогичную по названию дисциплину), поскольку эта дисциплина введена ГУУЗ НКТП в нормальные учебные планы для большинства специальностей энергетических втузов.

Применительно к программе, утвержденной ГУУЗ для сильноточных специальностей этих втузов, и написана эта книга.

Основой для книги послужили лекции по курсу: „Ионные преобразователи“, читаемые автором на сильноточных специальностях Московского энергетического института им. Молотова, а также работы автора, проводимые им в лаборатории ионных приборов Всесоюзного экспериментального института (ВЭИ).

В соответствии с утвержденной КВТО программой курса наибольшее внимание в книге уделено рассмотрению рабочего процесса в ионных приборах.

Так как студенты сильноточных специальностей не обладают достаточной подготовкой в области электрического разряда в газах, то необходимый минимум сведений из кинетической теории газов и разрядов в них автор счел нужным сообщить попутно с рассмотрением рабочего процесса ионных приборов, не выделяя их в самостоятельную главу.

Наряду с описанием физических процессов, автор дает описание конструкций, главным образом, применительно к продукции союзных заводов. Для иллюстрации количественных соотношений в описываемых процессах автор приводит ряд численных примеров.

Учебным целям (дипломному проектированию) служит также глава X, представляющая собой попытку наметить методику и схему расчета металлического ртутного преобразователя в соответствии с работами инженеров В. К. Крапивина и Д. Уайта.

Ограниченный объем книги не позволил, к сожалению, остановиться на вопросе о методах испытаний и специальных измерений, с которыми связана преобразовательная техника.

Описание преобразовательных установок и элементы их проектирования Энергоредакция предполагает выпустить отдельной книгой.

Отмечая рамки стоявших перед ним задач, автор будет рад всем замечаниям читателей, которые захотят взять на себя труд сообщить их автору по адресу: Москва, МЭИ, Коровий брод, 7.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность проф. К. А. Кругу и инженерам Д. Уайту и Г. И. Бабату за взятый ими на себя труд прочтения рукописи и за ряд ценных замечаний, сделанных ими, а также высказать свою благодарность товарищам по работе в ВЭИ инженерам М. И. Котылеву и Л. П. Мелешкиной за помощь, оказанную автору при технической подготовке рукописи к печати.

Нельзя не отметить также большого внимания, которое было проявлено при редактировании данной книги редактором Энергоредакции инж. К. М. Поливановым.

И. Каганов

Москва. Сентябрь 1936 г.

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

Ряд приемников электрической энергии нуждается в постоянном (прямом) токе, который является или технически единственно приемлемым видом тока (электрохимия, рентгентехника, радиотехника) или же видом тока, обеспечивающим ряд технических и экономических преимуществ электрической установке (электротранспорт, грузоподъемные устройства, измерительная и релейная техника и автоматика).

Между тем, почти вся электрическая энергия генерируется и передается к местам потребления в виде переменного тока, вследствие простоты устройства генераторов и асинхронных двигателей, а также из-за удобства трансформации. Поэтому при питании потребителей, нуждающихся в постоянном токе от общей сети переменного тока, встает вопрос о преобразовании переменного тока в ток постоянный.

Раньше (до 1910—1912 гг.) почти единственными преобразователями в области сильных токов были вращающиеся машины: мотор-генераторы и одноякорный преобразователь. Лишь в области слабых токов находил себе известное применение первый тип статического выпрямителя — электронная лампа.

Другой тип электрического выпрямителя — ртутный выпрямитель, получивший столь широкое применение в настоящее время, хотя и был известен уже давно (изобретен инж. Купер-Юйтом в 1901 г. и впервые выполнен в 1905—1908 г.), но долго не мог выйти за пределы лабораторных исследований из-за ряда недостатков. Только в 1914—1915 гг. были выпущены отдельными иностранными фирмами первые промышленные экземпляры металлических ртутных выпрямителей. Хотя это были аппараты, рассчитанные на нагрузку не свыше 150 kW и в техническом отношении недостаточно совершенные, тем не менее, их экономические показатели: к. п. д., стоимость и простота обслуживания показали, что эти выпрямители могут стать серьезным конкурентом вращающимся преобразователям. Последующие годы это целиком подтвердили. В настоящее время ртутные преобразователи вместе с другими типами новых приборов почти полностью заменили собой вращающиеся машины, применявшиеся для преобразования¹.

¹ В нашем Союзе стеклянные ртутные выпрямители начали строить в 1921 г. под руководством проф. В. П. Вологодина, а металлические мощные выпрямители начаты производством в 1927 г. на заводе „Электросила“ им. Кирова под

Роль ионных преобразователей особенно расширилась с момента введения в них (1928—1929 гг.) добавочного, управляющего разрядом, электрода, так называемой сетки.

Сетка открыла возможность: пользоваться ионным прибором для обратного преобразования тока из постоянного в переменный (инвертор), применять его в качестве преобразователя частоты, преобразователя числа фаз, автоматического выключателя, а также в некоторых случаях заменять ионным прибором коллектор вращающихся машин (вентильный двигатель).

Сетка, таким образом, превратила выпрямитель в универсальный преобразователь, для которого было предложено новое название (пока еще не общепринятое) — мутатор.

Расширение функций ионного прибора явилось в свою очередь базой дальнейшего, более широкого, применения этого прибора в электрохозяйстве и приблизило разрешение ряда крупных проблем электроэнергетики, таких, как: передача энергии постоянным током, рекуперация энергии на тяговых и грузоподъемных установках, осуществление связи промышленных и тяговых сетей разной частоты и, наконец, трансформация постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения.

Наряду с ртутными преобразователями в последние годы получили также весьма большое распространение: твердые выпрямители и газотроны и тиратроны. Последние являются одним из позднейших, но очень быстро развивающихся типов преобразователей¹.

Наконец, значительный интерес представляют некоторые преобразователи, еще не получившие окончательного промышленного завершения. К их числу относится преобразователь, известный под названием и г н а й т р о н², и преобразователь с дугой в воздухе, предназначенный для выпрямления больших токов при высоких напряжениях³.

Наибольшее внимание в настоящем курсе уделено анализу работы и устройству ионных приборов, являющихся основными типами преобразователей в области сильного тока.

Рассмотрение рабочего процесса электронных приборов преследовало, главным образом, подсобную цель, а именно: облегчить более углубленное изучение рабочего процесса в ионных приборах, являющихся как бы логическим развитием электронных.

Кратким изложением принципов работы механических выпрямителей и перечислением основных типов их имелось в виду лишь ориентировать в вопросе о возможных принципах выпрямления тока.

руководством инж. В. К. Крапивина. Первые металлические выпрямители допускали нагрузку до 300 А при напряжении 600 В, но уже в 1935 г. завод „Электросила“ выпустил из производства ртутные выпрямители на 5 000 А в одном цилиндре при напряжении 800 В.

¹ Этот тип преобразователей строится на заводе „Светлана“ в Ленинграде. Их производство начато в 1931 г.

² Лабораторные экземпляры стеклянного и металлического игнайтрон^{ов}, построенные фирмой Вестингауз в Америке и ВЭИ в нашем Союзе, показывают, что данный тип выпрямителя может рассчитывать на широкое применение.

³ Первые типы разработаны и построены Э. Марксом,

Выпрямителей с тлеющим разрядом и незаконченных еще разработанных приборов с магнитным управлением мы, чтобы не увеличивать объем курса, совершенно не касаемся.

При изучении важнейших типов выпрямителей наряду с изложением физической стороны рабочего процесса и конструктивного оформления приборов в настоящем курсе рассмотрены также вопросы, относящиеся к схемам питания выпрямительных установок.

Минимум сведений по схемам питания маломощных выпрямителей дается в начале курса, что позволяет решать задачи, связанные с расчетом и подбором отдельных маломощных выпрямительных установок, изучения мощных выпрямителей.

Схемы питания мощных ртутных выпрямителей рассматриваются в отдельной главе курса.

Преобразование постоянного тока в переменный и некоторые другие более сложные преобразования тока рассмотрены в отдельной главе.

Необходимый минимум сведений из теории газового разряда из методических соображений сообщается попутно с рассмотрением рабочего процесса того или иного прибора.

ГЛАВА II

ВЫПРЯМЛЕНИЕ ТОКА

1. Принципы выпрямления тока и типы выпрямителей

Электрическая цепь, состоящая из металлических проводников, одинаково проводит ток как в одном, так и в другом направлении, т. е. проводимость цепи не зависит от направления протекания тока. Поэтому, если такую цепь подключить к переменному напряжению, то и ток в ней будет также переменным.

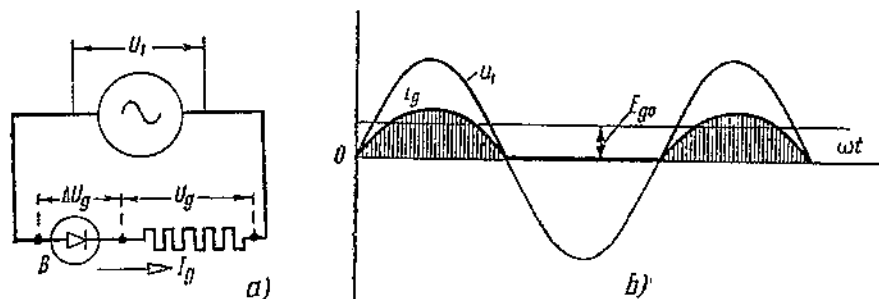
Если перед нами стоит задача получить в цепи, в которой действует переменное напряжение, ток постоянный, т. е. ток, протекающий только в одном направлении, то она может быть решена путем создания в цепи условия односторонней (униполярной) проводимости, т. е. условия, при котором путь для электрических зарядов был бы открыт только в одном направлении. Прибор, обладающий такой односторонней проводимостью, имеет общее название **вентиль**.

При наличии в цепи такого вентиля (обозначенного на фиг. 1, а буквой В) мы получаем, что при одной полуволне напряжения, называемой **положительной**, или **положительной**, ток по цепи будет проходить, а при другой полуволне напряжения, называемой **отрицательной**, или **отрицательной**, тока в цепи не будет (фиг. 1, б).

В такой простейшей схеме получается выпрямление только одной полуволны тока, и выпрямленный ток оказывается прерывистым. Включив несколько вентилях, можно получить непрерывную кривую выпрямленного тока, по форме близкую к кривой тока, получаемого от трансформаторов постоянного тока.

Работа вентиля может быть основана:

1) на механическом действии, заключающемся в том, что один из участков цепи тока механически прерывается на ту часть периода, когда ток через этот участок не должен проходить — класс механических выпрямителей (фиг. 2);



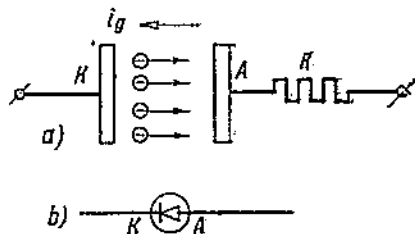
Фиг. 1. а — цепь с униполярной проводимостью; б — диаграмма тока и напряжения.

2) на электрическом действии, заключающемся в том, что внутри прибора создаются условия, при которых электрические заряды определенного знака могут проходить только в одном направлении (фиг. 3, а), — класс электрических выпрямителей.

На фиг. 3, а схематически показан электрический выпрямитель, в котором перенос электричества осуществляется только отрицательными зарядами, способными перемещаться только в одном направлении — от катода K к аноду A . Направление выпрямленного тока (согласно условно принятому направлению для тока — по движению положительных зарядов) будет при этом противоположно (от A к K). Этому соответствует направление стрелки на условном обозначении (фиг. 3, б).



Фиг. 2. Схема механического выпрямителя.



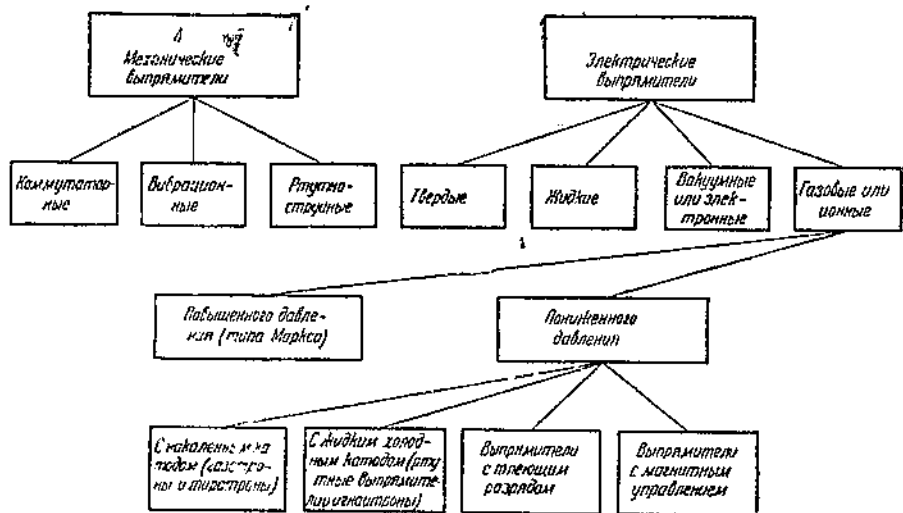
Фиг. 3. а — схема электрического выпрямителя; б — условное обозначение электрического вентиля.

Механические и электрические выпрямители распадаются в свою очередь на ряд типов, охватываемых в основном следующей классификацией (см. стр. 9).

Из перечисленных типов выпрямителей наибольшее распространение, как выше указывалось, имеют электрические выпрямители, более совершенные как по своему рабочему процессу, так и по своему практическому выполнению.

Из электрических выпрямителей наибольшее распространение в области слабых токов имеют электронные или вакуумные выпрямители, меньшее — выпрямители тлеющего разряда; в области сильных токов наибольшее распространение получили ртутные выпрямители, а в последние годы значительное применение получили также газотроны и тиратроны.

Классификация выпрямителей



2. Общие требования к выпрямителям

Прежде чем перейти к изучению рабочего процесса отдельных типов выпрямителей, полезно остановиться на некоторых общих требованиях, предъявляемых к любому выпрямителю независимо от его типа.

Первое требование. На выпрямитель должно приходиться возможно малое падение напряжения в проводящую часть периода, так как эта величина определяет к. п. д. прибора. Действительно, когда через выпрямитель проходит ток, напряжение источника тока распределяется (фиг. 1, а) между выпрямительным элементом (внутреннее падение напряжения ΔU_p) и внешним сопротивлением, являющимся потребителем электрической энергии (рабочее напряжение U_g). При одном и том же токе, проходящем через все элементы цепи, мощность в двух рассматриваемых элементах цепи распределяется пропорционально напряжению. Мощность, выделяемая в выпрямительном элементе (потеря мощности),

$$\Delta P = \Delta U_p I_g, \quad (\text{II, 1})$$

мощность, отдаваемая потребителю,

$$P_g = U_g I_g, \quad (\text{II, 2})$$

общая мощность, получаемая от источника,

$$P_g + \Delta P = I_g (U_g + \Delta U_p).$$

В этих формулах:

U_g — среднее значение напряжения выпрямленного тока или рабочее напряжение;

I_g — среднее значение выпрямленного тока;

ΔU_g — внутреннее падение напряжения в выпрямителе.

Кэффициент полезного действия выпрямителя определяется как отношение мощности, переданной потребителю P_g , к мощности, полученной от источника,

$$\eta = \frac{P_g}{P_g + \Delta P_g} = \frac{U_g I_g}{U_g I_g + \Delta U_g I_g} = \frac{U_g}{U_g + \Delta U_g}. \quad (\text{II, 3})$$

Формула (II, 3) действительно показывает, что к. п. д. выпрямителя при заданном рабочем напряжении будет тем выше, чем меньше внутреннее падение напряжения в выпрямителе. Кроме того, из формулы (II, 3) следует также, что при неизменном ΔU_g к. п. д. выпрямителя тем выше, чем выше напряжение выпрямленного тока U_g .

Пример. Падение напряжения в ртутном выпрямителе $\Delta U_g \approx 25$ В, в газотроне $\Delta U_g \approx 15$ В. Определить к. п. д. каждого из выпрямителей при работе в сети с напряжением $U_g = 220$ В и $U'_g = 1\,500$ В.

В сети с напряжением $U_g = 220$ В ртутный выпрямитель работает с к. п. д.

$$\eta_{11} = \frac{220}{220 + 25} = 0,898,$$

а газотрон с к. п. д.

$$\eta_{12} = \frac{220}{220 + 15} = 0,935.$$

В сети с напряжением 1 500 В ртутный выпрямитель работает с к. п. д.

$$\eta'_{11} = \frac{1\,500}{1\,500 + 25} = 0,984,$$

а газотрон с к. п. д.

$$\eta'_{12} = \frac{1\,500}{1\,500 + 15} = 0,99.$$

Мы видим, что в обоих случаях к. п. д. газотрона выше, чем к. п. д. ртутного выпрямителя, но для сети с напряжением 1 500 В разница в к. п. д. заметно меньше.

Второе требование. Выпрямитель должен обладать достаточно высокой вентильной прочностью, т. е. он должен выдерживать с запасом то напряжение, которое устанавливается на его электродах в отрицательную часть периода (обратное напряжение), когда вентиль, размыкая цепь, не пропускает тока.

Определяя величину того напряжения, при котором вероятность пробоя в вентиле делается достаточно заметной как пробивное напряжение, мы можем сказать, что для нормальной работы необходимо, чтобы пробивное напряжение выпрямителя было больше максимально возможной величины обратного напряжения.

Пробивное напряжение ограничивает допустимую величину обратного напряжения, а последнее в свою очередь определяет величину рабочего напряжения. В результате пробивное напряжение определяет величину рабочего напряжения, при котором может быть применен тот или иной выпрямитель.

Третье требование. Выпрямитель должен иметь достаточно длительный срок службы.

Это требование является общим для всех машин и аппаратов. Но в отношении электронно-лучевых приборов приходится его особо отметить, поскольку ряд типов этих приборов органически связан с непрерывным износом одного из электродов — катода.

3. Выпрямление однофазного тока

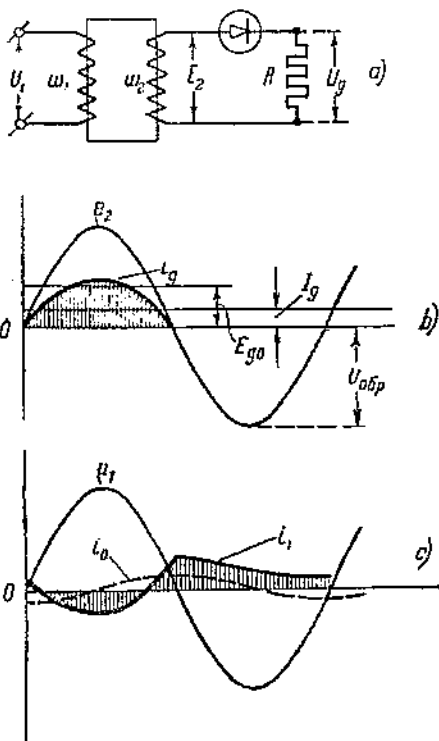
Здесь мы ограничимся рассмотрением типовых схем, имеющих применение для выпрямителей малой и средней мощности. К таким относятся, главным образом, схемы однофазного и трехфазного выпрямления тока.

При выпрямлении однофазного тока возможно однополупериодное и двухполупериодное выпрямление тока. В первом случае в цепи потребителя ток проходит только в течение одной полувольты напряжения; во втором случае потребитель получает выпрямленный ток в течение обеих полувольт напряжения.

а) Однополупериодное выпрямление. Простейшая схема однополупериодного выпрямления уже была приведена выше (фиг. 1). Эта схема может быть применена только в том случае, когда при данном напряжении переменного тока выпрямленное напряжение как раз получается равным требуемой величине.

На практике это бывает сравнительно редко. Большей частью выпрямление тока связано с предварительным изменением напряжения переменного тока, что производится посредством включения в схему выпрямления трансформатора, как это показано на фиг. 4, а.

Определим интересные нас соотношения между токами и напряжениями для простейшего случая такой схемы, а именно, когда цепь нагрузки представляет собой чисто



Фиг. 4. а — схема однополупериодного выпрямления; б — диаграмма напряжения и тока во вторичной цепи; в — диаграмма напряжения и тока в первичной цепи.

омическое сопротивление. Пренебрегая падением напряжения в приборе и трансформаторе и считая синусоидальным напряжение во вторичной обмотке трансформатора (фиг. 4, б), находим среднее значение выпрямленного напряжения или его постоянную составляющую

$$E_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} E_2 \sin x dx = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 = 0,45 E_2; \quad (\text{II}, 4)$$

здесь $E_{\text{ср}}$ — напряжение холостого хода (напряжение, не учитывающее внутреннего падения напряжения в приборе);

E_2 — эффективное значение переменного напряжения.

Коэффициент трансформации, которым должен обладать трансформатор, чтобы при заданном U_1 получить нужное $E_{\text{ср}}$, определяется из соотношения

$$k = \frac{U_1}{E_2} = \frac{\sqrt{2} U_1}{\pi E_{\text{ср}}}. \quad (\text{II}, 5)$$

Обратное напряжение (определяемое в дальнейшем по максимальной величине его), по которому проверяется запирающее действие вентиля, в данной схеме равно амплитуде переменного напряжения:

$$U_{\text{обр}} = \sqrt{2} E_2 = \pi E_{\text{ср}}. \quad (\text{II}, 6)$$

Последняя формула показывает, что в данной схеме вентиляционная прочность элементов должна быть рассчитана на величину напряжения, которая в 3,14 раза больше постоянной составляющей выпрямленного напряжения $E_{\text{ср}}$.

Среднее значение выпрямленного тока, по которому определяется нагрузочная способность и падение напряжения в выпрямителе, мы можем определить по среднему значению выпрямленного напряжения, так как при чисто активном сопротивлении форма кривой тока совпадает с формой кривой напряжения:

$$I_{\text{ср}} = \frac{E_{\text{ср}}}{R}. \quad (\text{II}, 7)$$

Эффективное значение тока во вторичной обмотке трансформатора I_2 , интересующее нас для оценки тепловой нагрузки токоподводящих проводов и нагрева вторичной обмотки трансформатора, может быть определено по формуле

$$I_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_{\text{ср}}^2 dx = \frac{2E_{\text{ср}}^2}{2\pi R^2} \int_0^{\pi} \sin^2 x dx = \frac{E_{\text{ср}}^2}{2R^2},$$

откуда

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{E_2}{R} = \frac{\pi}{2} \frac{E_{\text{ср}}}{R} = \frac{\pi}{2} I_{\text{ср}} = 1,57 I_{\text{ср}}. \quad (\text{II}, 8)$$

Амплитуда тока, которая является также весьма существенной характеристикой нагрузочной способности для ряда типов выпрямителей, в данной схеме равна

$$I_{g \max} = \frac{\sqrt{2}E_g}{R} = \pi I_g = 3,14 I_g. \quad (\text{II}, 9)$$

Соотношение между амплитудой и средним значением для тока то же, что и для напряжения, поскольку в цепи чисто омическое сопротивление.

Так как из общего тока i_g , протекающего по вторичной обмотке трансформатора, трансформироваться может только переменная составляющая этого тока ($i_g - I_g$), то первичный ток в обмотке трансформатора, противоположный по знаку вторичному току, будет равен [Л. II, 1]

$$i_1 = \frac{1}{k} (I_g - i_g) + i_0, \quad (\text{II}, 10)$$

где i_0 — ток холостого хода.

Построенная по данному уравнению кривая первичного тока показана на фиг. 4, с.

Особенность этой кривой заключается в том, что ток в первичной обмотке протекает в течение целого периода переменного тока, между тем как вторичный ток во вторичной обмотке трансформатора проходит только в течение одного полупериода.

Эффективное значение первичного тока, если пренебречь током холостого хода, будет

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{i_g - I_g}{k} \right)^2 dx} = \frac{1,21}{k} I_g. \quad (\text{II}, 11)$$

Зная токи и напряжения вторичной и первичной обмоток, мы можем теперь подсчитать типовую мощность трансформатора (мощность, на которую рассчитывается трансформатор), которая является средней арифметической из мощностей обеих обмоток:

$$P_t = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{I_1 U_1 + E_2 I_2}{2}. \quad (\text{II}, 12)$$

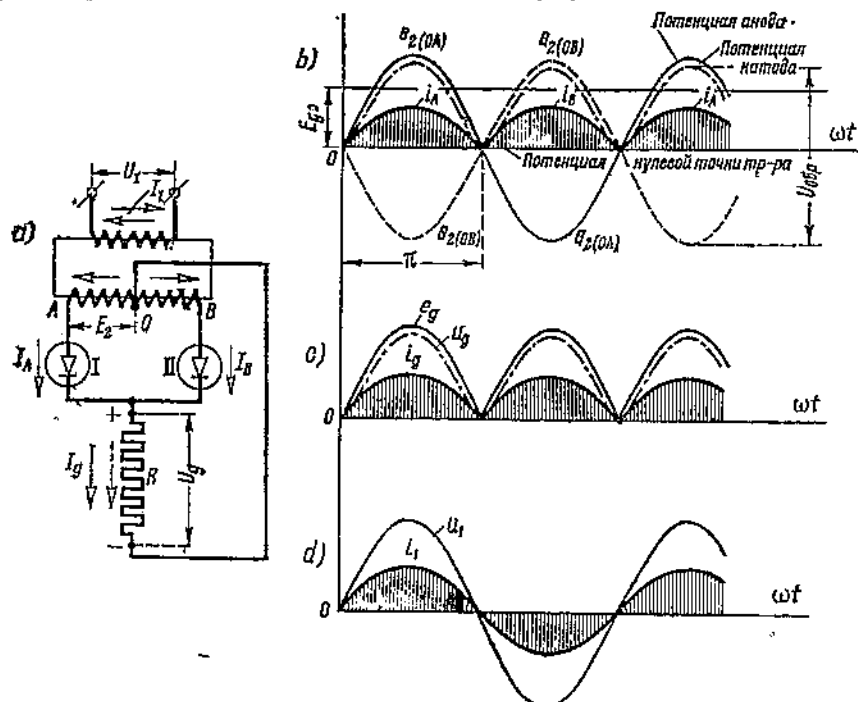
Заменяя U_1 , I_1 , E_2 , I_2 через соответствующее значение выпрямленного напряжения и тока из формул (II,4), (II,5), (II,8) и (II,11), мы получаем

$$\begin{aligned} P_t &= \frac{\frac{\pi}{\sqrt{2}} E_g k \frac{1,21}{k} I_g + \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{2} I_g E_g}{2} = \\ &= \frac{(2,69 + 3,49)}{2} E_g I_g = 3,09 P_g. \end{aligned} \quad (\text{II}, 13)$$

Формула (II, 13) показывает, что расчетные мощности обеих обмоток

и типовая мощность трансформатора заметно превосходят мощность в цепи выпрямленного тока. Это является обычным для трансформаторов, питающих выпрямленные установки, так как здесь действующие значения токов (определяющие нагрев обмоток, а следовательно, типовую расчетную мощность трансформаторов) заметно превосходят средние значения выпрямленных токов вследствие того, что ток через вторичную обмотку проходит только в течение части периода переменного тока.

б) Двухполупериодное выпрямление. При двухполупериодном выпрямлении применяются две типовых схемы, которые по существу могут рассматриваться как схемы выпрямления двухфазного тока.



Фиг. 5. а — однофазная схема с выводом нулевой точки трансформатора; б — диаграмма напряжения и тока во вторичной обмотке трансформатора; в — диаграмма выпрямленного напряжения и тока; г — диаграмма напряжения и тока в первичной обмотке трансформатора.

1. Схема с выводом нулевой точки у трансформатора. В данной схеме выпрямление обеих полувольт тока достигается тем, что у вторичной обмотки трансформатора выделена средняя или нулевая точка (O на фиг. 5, а), которая делит вторичную обмотку трансформатора на две полуобмотки OA и OB. В течение одного полупериода потенциал конца A в полуобмотке OA положителен по отношению к выделенной нулевой точке O (фиг. 5, б), в то время как потенциал конца B полуобмотки OB отрицателен; в течение дру-

того полупериода потенциал конца B становится положительным, а потенциал конца A отрицательным по отношению к нулевой точке.

Благодаря выделению нулевой точки напряжение вторичной обмотки трансформатора разбивается, таким образом, на две фазы, сдвинутые друг по отношению к другу на 180° .

Так как ток через выпрямитель может проходить только тогда, когда анод положителен по отношению к катоду, то в течение одного полупериода ток проходит через вентиль I , полуобмотку OA и сопротивление R , а в течение второго полупериода ток проходит через вентиль II , полуобмотку OB и опять через сопротивление R . Направление тока у потребителя при этом не меняется (фиг. 5, c), т. е. через цепь нагрузки проходит выпрямленный ток.

Если нагрузкой является чисто активное сопротивление и индуктивностью от потоков рассеяния в трансформаторе мы пренебрегаем, то обе полусинусоиды выпрямленного тока совпадают по фазе с двумя полусинусоидами напряжения, определяющими собой кривую выпрямленного напряжения.

Среднее значение выпрямленного напряжения, не учитывая внутреннего падения в вентиле, будет

$$E_g = \frac{\sqrt{2}E_2}{\pi} \int_0^\pi \sin x \, dx = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 = 0,90E_2, \quad (II, 14)$$

где E_2 — эффективное значение переменного напряжения одной полуобмотки.

Если не пренебрегать внутренним падением напряжения в вентиле, кривая выпрямленного напряжения U_g проходит на ΔU ниже (пунктирная кривая на фиг. 5, c). Последняя кривая дает одновременно потенциалы катодов обоих выпрямителей, поскольку оба катода электрически между собой связаны.

Обратное напряжение, определяемое максимальной разностью потенциалов между катодом и анодом у не работающего в данный полупериод вентиля, будет в данной схеме равно почти двойной величине амплитуды фазового напряжения. Это легко видеть и из диаграммы фиг. 5, b , где потенциал анода у запирающего прибора определяется отрицательной полусинусоидой, а потенциал катода — пунктирной линией, и из схемы, которая показывает, что общий потенциал катодов работающего и не работающего прибора определяется потенциалом одного конца обмотки трансформатора (если пренебречь внутренним падением напряжения у работающего прибора), а потенциал анода не работающего прибора — потенциалом другого конца вторичной обмотки трансформатора:

$$U_{обр} = 2\sqrt{2}E_2 = \pi E_g. \quad (II, 15)$$

Среднее значение выпрямленного тока для данной схемы определяется, как и для предыдущей схемы, по формуле (II, 7).

В каждом приборе это значение тока будет в два раза меньше

$$I_a = \frac{I_g}{2}.$$

Отношение амплитудного значения тока к среднему его значению в каждом вентиле будет такое же, как и при однополупериодном выпрямлении, а именно:

$$\frac{I_{g \max}}{I_a} = 3,14.$$

В цепи потребителя R отношение максимального значения тока к среднему его значению будет в два раза меньше:

$$\frac{I_{g \max}}{I_g} = 1,57. \quad (\text{II}, 16)$$

Эффективное значение тока во вторичной обмотке трансформатора

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_g^2 dx} = \frac{\pi}{4} I_g = 0,785 I_g. \quad (\text{II}, 17)$$

Отношение эффективного значения тока в первичной обмотке к среднему значению выпрямленного тока такое же, как для синусоидального переменного тока, поскольку ток через эту обмотку протекает в течение обеих полувольт переменного тока (фиг. 5, d):

$$I_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_g \frac{1}{k} = 1,11 I_g \cdot \frac{1}{k}, \quad (\text{II}, 18)$$

где k — коэффициент трансформации для полуобмотки.

Расчетная мощность вторичной обмотки трансформатора

$$P_2 = 2E_2 I_2 = \frac{\pi^2 \sqrt{2}}{8} E_g I_g = 1,74 P_g. \quad (\text{II}, 19)$$

Расчетная мощность первичной обмотки

$$P_1 = U_1 I_1 = \frac{\pi^2}{8} E_g I_g = 1,23 P_g. \quad (\text{II}, 20)$$

Типовая мощность трансформатора

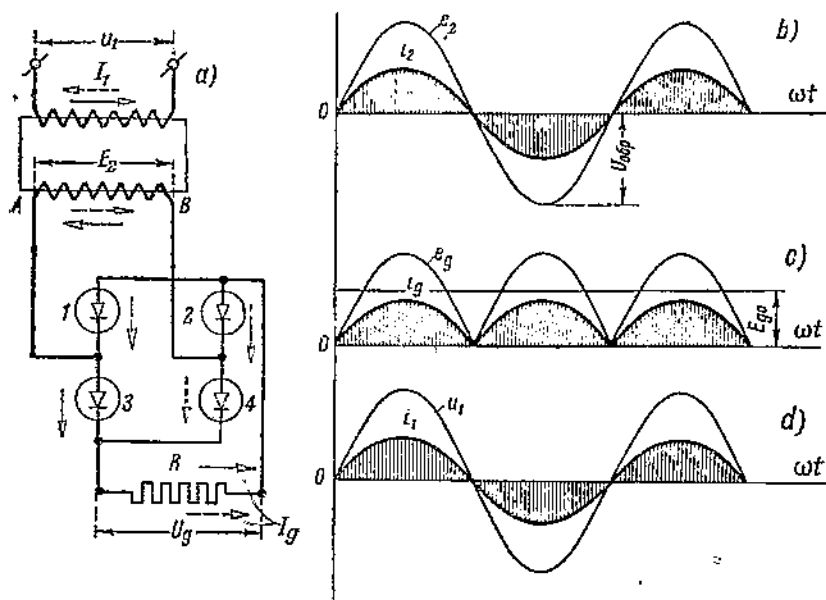
$$P_t = \frac{P_1 + P_2}{2} = 1,48 P_g. \quad (\text{II}, 21)$$

2. Схема Грэтца. Схема, известная под этим названием, представлена на фиг. 6, а.

Она представляет собой мостик Уитстона, у которого вместо сопротивлений включены четыре выпрямительных элемента. К одним противолежащим вершинам мостика приключен потребитель выпрямленного тока — сопротивление R , к другим вершинам — сеть переменного

тока. Отдельные выпрямительные элементы включены с таким направлением вентильности, что ток при одной полуволне напряжения проходит по направлению, отмеченному сплошными стрелками, при другой полуволне напряжения — по пути, отмеченному пунктирными стрелками. При этом через сопротивление R ток проходит всегда в одном и том же направлении.

Диаграммы для напряжений и токов представлены для этой схемы на фиг. 6, *b*, *c* и *d*. Разница по сравнению с предыдущей схемой заключается здесь в том, что ток во вторичной обмотке трансформатора



Фиг. 6. *a* — однофазная схема Грэтца; *b* — диаграмма тока и напряжения во вторичной обмотке трансформатора; *c* — диаграмма тока и напряжения в цепи выпрямленного тока; *d* — диаграмма тока и напряжения в первичной обмотке трансформатора.

протекает, как и в первичной обмотке, в течение всего периода переменного напряжения.

Поэтому мощности первичной и вторичной обмоток, а следовательно, и типовая мощность трансформатора равны мощности первичной обмотки, значение которой, как и в предыдущей схеме [см. (II, 20)], равно

$$P_t = P_1 = P_2 = 1,23 P_g. \quad (\text{II}, 20')$$

Обратное напряжение в данной схеме равно амплитуде фазового напряжения. Действительно, в ту часть периода, когда какой-либо из выпрямительных элементов не пропускает тока, скажем, выпрямитель 1, мы можем считать, что все напряжение приходится на этот элемент, поскольку внутренним падением напряжения в последовательно соединенном с ним элементе 2, пропускающем ток в данной части периода, мы можем пренебречь.

При одном и том же напряжении выпрямленного тока обратное напряжение в этой схеме оказывается, следовательно, в два раза меньше, чем в предыдущей,

$$U_{обр} = \frac{\pi}{2} E_{гг} = 1,57 E_{гг}, \quad (II,22)$$

Делая сравнительную оценку обеих схем, мы видим, что трансформатор в схеме Грэтца имеет меньшую типовую мощность, но зато в схеме Грэтца требуется двойное число выпрямительных элементов. Однако последнее верно только тогда, когда каждое плечо мостика не приходится собирать из ряда последовательно соединенных выпрямительных элементов для получения требуемой вентиляционной прочности. Если же каждый выпрямительный комплект собирается из групп последовательно соединенных элементов, то количество элементов в схеме с нулевым выводом и в схеме Грэтца будет одинаковым, так как в первой схеме из-за вдвое большей величины обратного напряжения будет требоваться двойное число последовательно соединенных элементов. В этом случае схема Грэтца имеет явные преимущества перед схемой с нулевым выводом у трансформатора.

4. Выпрямление трехфазного тока

При выполнении трехфазного тока могут быть также применены: 1) схема с нулевым выводом у трансформатора и 2) схема Грэтца.

1. Трехфазная схема с выводом нулевой точки у трансформатора изображена на фиг. 7, а. Вторичная обмотка трансформатора, питающая цепь выпрямленного тока, соединена в звезду, нулевая точка которой служит отрицательным полюсом для цепи нагрузки. В каждую из трех фаз вторичной обмотки включено по одному выпрямительному элементу. Катоды всех выпрямителей электрически между собой связаны и служат положительным полюсом для цепи нагрузки. Ток через ту или иную фазу вторичной обмотки и, следовательно, через соответствующий выпрямитель проходит только тогда, когда напряжение данной фазы выше остальных, т. е. в течение $\frac{1}{3}$ периода (фиг. 7, б и с).

Это обусловлено соотношением потенциалов, устанавливающихся при работе выпрямительной цепи.

Действительно, у работающего выпрямительного элемента (т. е. у элемента, пропускающего в данный момент ток) потенциал катода (фиг. 7, б) отличается от потенциала своего анода лишь на небольшую величину внутреннего падения напряжения (пунктирная кривая U_g на фиг. 7, б), и если этот потенциал (потенциал всех катодов) выше потенциалов других анодов, то ток через соответствующие выпрямительные элементы в данную часть периода проходить не будет.

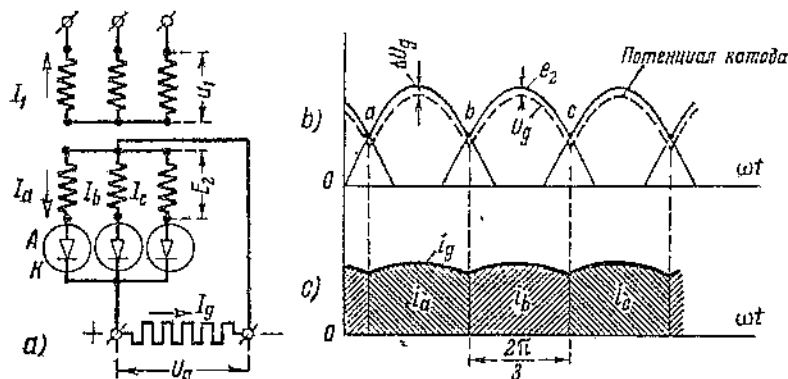
В тот момент, когда наиболее высоким оказывается потенциал следующей фазы, ток начинает проходить через следующий анод. Такое чередование происходит при трехфазном выпрямлении через каждую $\frac{1}{3}$ периода. Точки а, б, с на диаграмме фиг. 7, б как раз соответствуют моментам перехода тока с одного анода на другой.

Кривая выпрямленного напряжения с учетом внутреннего падения напряжения в приборе определяется пунктирной кривой катодных потенциалов (U_g на фиг. 7, б).

Среднее значение выпрямленного напряжения, без учета падения напряжения в вентиле, для общего случая, когда число фаз равно m , получается равным

$$E_{g0} = \frac{1}{\frac{2\pi}{m}} \int_{-\frac{\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} \sqrt{2} E_2 \cos x \, dx = \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}. \quad (\text{II}, 23)$$

Здесь $x = \omega t$.



Фиг. 7. а — трехфазная схема с выводом нулевой точки трансформатора; б — диаграмма напряжения; в — диаграмма токов.

В частном случае, когда $m=3$, формула (II,23) дает

$$E_{g0} = 1,17 E_2. \quad (\text{II}, 24)$$

Обратное напряжение в данной схеме равно

$$U_{обр} = \sqrt{3} \sqrt{2} E_2 = 2,09 E_{g0}. \quad (\text{II}, 25)$$

Среднее значение выпрямленного тока при чисто омическом сопротивлении в цепи нагрузки, выраженное через амплитуду этого тока, будет

$$I_g = \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{+\frac{\pi}{3}} I_{g \max} \cos x \, dx = \frac{3 \sin \frac{\pi}{3}}{\pi} I_{g \max} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} I_{g \max} = 0,826 I_{g \max} \quad (\text{II}, 26)$$

или

$$\frac{I_{g \max}}{I_g} = 1,21.$$

Так как среднее значение тока в каждом отдельном выпрямительном элементе будет в три раза меньше, то

$$I_a = \frac{I_g}{3}$$

или

$$\frac{I_{g \max}}{I_a} = 3,63. \quad (\text{II}, 27)$$

Определение эффективных значений токов в первичной и во вторичной обмотке, а также расчет мощности трансформатора для данной схемы, требующие несколько более сложных вычислений, отнесены к гл. XII, где специально рассмотрены схемы многофазного выпрямления тока.

2. Схема Грэтца при трехфазном токе изображена на фиг. 8, *a*. Она отличается от ранее приведенной двухфазной схемы (фиг. 6, *a*) только наличием еще одной пары выпрямительных элементов. К середине каждой из трех пар элементов присоединены выводы вторичной обмотки трансформатора. В результате получается выпрямление всех шести полуоволн линейных напряжений. Это дает основание отнести трехфазную схему Грэтца к схеме шестифазного выпрямления тока. Чередование работы отдельных выпрямительных элементов можно проследить по диаграммам тока и напряжения (фиг. 8, *b* и *c*).

Токи, протекающие через отдельные элементы, на диаграмме фиг. 8, *c* обозначены теми же цифрами, что и соответствующие элементы на фиг. 8, *a*, а линейные напряжения на диаграмме фиг. 8, *b* обозначены теми же буквами, что и концы соответствующих фаз трансформатора на фиг. 8, *a*. Токи через элементы показаны без пульсаций в предположении, что включенная в цепь выпрямительного тока индуктивность L_g достаточно велика.

Отношение среднего значения выпрямленного напряжения к эффективному значению переменного напряжения мы получаем, подставив в формулу (II, 23) $m=6$:

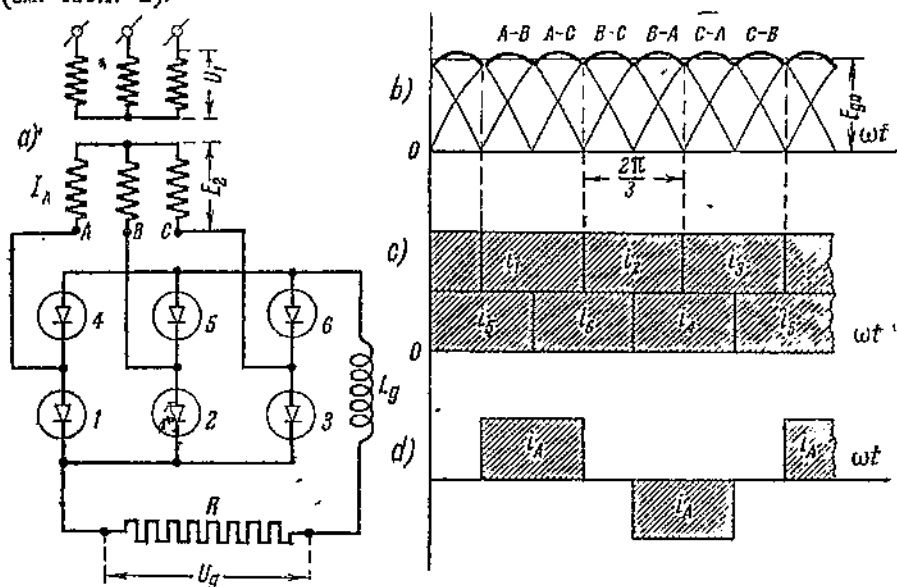
$$E_{g0} = 1,35 E_g. \quad (\text{II}, 28)$$

Обратное напряжение в данной схеме, как и в двухфазной схеме Грэтца, в два раза меньше, чем при схеме с выведенным нулем трансформатора:

$$U_{обр} = 1,045 E_{g0}. \quad (\text{II}, 29)$$

Так как каждый из выпрямительных приборов работает в течение $1/3$ периода (фиг. 8, *a*), то для токов в выпрямительных элементах этой схемы мы получаем те же соотношения, что и в предыдущей. Через вторичные обмотки трансформатора теперь протекает трехфазный переменный ток. Ток в одной из фаз *A* показан на фиг. 8, *d*.

В трехфазной схеме Грэтца пульсации выпрямленного тока и напряжения получаются значительно меньше, чем в предыдущей схеме (см. табл. 2).



Фиг. 8. *a* — схема Грэтца для выпрямления трехфазного тока; *b* — диаграмма напряжения; *c* — диаграмма токов, протекающих через отдельные вентили; *d* — диаграмма тока в фазе *A* вторичной обмотки трансформатора.

ТАБЛИЦА 1

Соотношения токов и напряжений в простейших схемах выпрямления

№ по пор.	Название схемы	$\frac{E_{g0}}{E_2}$	$\frac{U_{обр}}{E_{g0}}$	$\frac{I_{\theta max}}{I_g}$	$\frac{I_{\gamma max}}{I_a}$
1	Однополупериодная схема	0,45	3,14	3,14	3,14
2	Схема с нулевым выводом двухфазная	0,90	3,14	1,57	3,14
3	Схема Грэтца двухфазная	0,90	1,57	1,57	3,14
4	Схема с нулевым выводом трехфазная	1,17	2,09	1,21	3,63
5	Схема Грэтца трехфазная	1,35	1,045	1,21	3,63

Кроме того, трехфазная схема Грэтца обладает всеми преимуществами, перечисленными при рассмотрении схемы двухфазного выпрямления.

Найденные выше соотношения для всех рассмотренных пяти схем сведены в табл. 1 (стр. 21).

5. Пульсации тока и напряжения

Составленная из отдельных отрезков синусоид кривая выпрямленного напряжения является пульсирующей кривой, т. е. помимо среднего значения она содержит еще высшие гармонические напряжения. Эти гармонические, являясь слагаемыми ряда Фурье, могут быть определены по формуле

$$E_{n \max} = \frac{m}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} \sqrt{2} E_a \cos x \cos nx \, dx = \frac{2 E_{a0}}{n^2 - 1}, \quad (\text{II}, 30)$$

в которой m — определяет собой число фаз;

n — порядок гармонической;

$E_{n \max}$ — определяет искомую амплитуду n -й гармонической напряжения.

ТАБЛИЦА 2

Относительные величины гармонических, подсчитанные по формуле (II, 30)

№ по табл. 1	Для схемы	Частота гармонической наименьшей кратности ¹ в Hz	Отношение амплитуд гармонических к постоянной составляющей		
			$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
1	Однополупериодное выпрямление	50	1,57	0,667	0,250
2	Двуполупериодное выпрямление	100	0,667	0,133	0,057
и 3	Схема с нулевым выводом трехфазная	150	0,250	0,057	0,025
4	Схема Грэтца трехфазная и шестифазная схема с нулевым выводом (см. гл. XII)	300	0,057	0,014	0,006

Поскольку кривая выпрямленного напряжения состоит из отрезков синусоид, число которых кратно числу фаз, постольку гармонические,

¹ При частоте выпрямляемого напряжения $f = 50$ Hz.

входящие в данную кривую напряжения, могут иметь порядок, только кратный числу фаз, т. е.

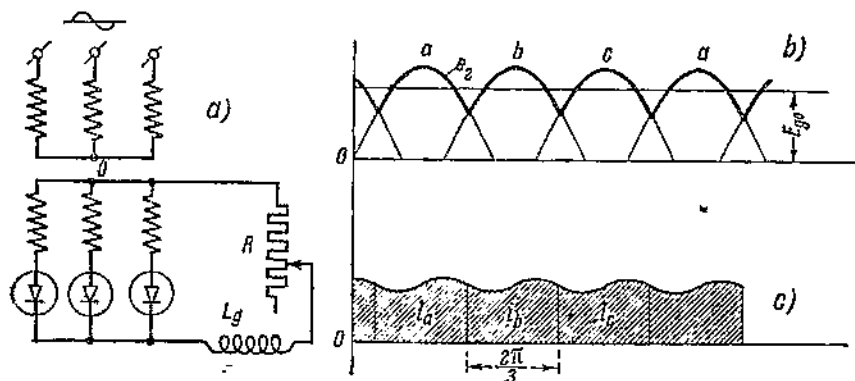
$$n = km,$$

где k — любое целое число, показывающее порядок кратности.

Поэтому для определения амплитуд гармонических одного и того же порядка, но получаемых при разном числе фаз в выпрямительной схеме, может быть применена формула (II, 30), которую можно переписать также в таком виде:

$$\frac{E_{a \max}}{E_{g0}} = \frac{2}{(km)^2 - 1}. \quad (\text{II, } 30')$$

Подсчитанные по формуле (II, 30') относительные величины гармонических первых трех кратностей для схем, рассмотренных в § 3 и 4,



Фиг. 9. a — схема с индуктивностью для сглаживания кривой выпрямленного тока; b — диаграмма напряжений; c — диаграмма тока.

сведены в табл. 2, в которой также указаны и частоты, соответствующие гармонической с кратностью $k=1$.

Пульсация выпрямленного напряжения вызывает также пульсацию выпрямленного тока. Величина последней зависит от постоянных (сопротивления, индуктивности и емкости) контура.

В ряде случаев применения выпрямителей, как, например, при зарядке аккумуляторных батарей, пульсация выпрямленного тока не вызывает заметных осложнений. В других случаях, как, например, тяговые сети, установки связи, кино и т. д., пульсации в выпрямленном токе стремятся свести к минимуму, поскольку такие пульсации вызывают добавочные потери или же вызывают мешающее действие (линии связи). Для уменьшения пульсаций тока в таких установках в цепь выпрямленного тока включаются или реактивные катушки (фиг. 9, a) или же реактивные катушки вместе с емкостями (фильтры). Схема с простейшим фильтром показана на фиг. 10, a .

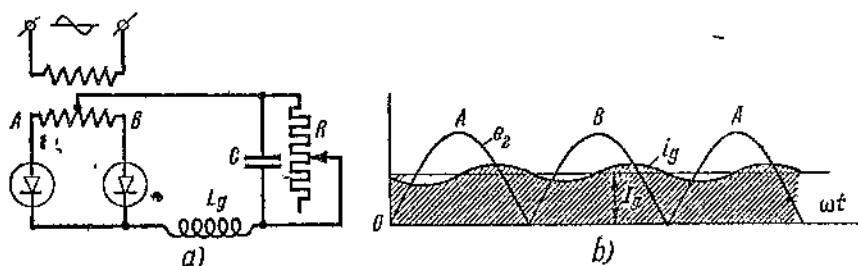
На фиг. 9, b , c и 10, b даны также кривые выпрямленного тока и напряжения.

При ограничении пульсации тока одной индуктивностью требуемая величина индуктивности может быть рассчитана по формуле [Л. V, 8]

$$L_g = \frac{E_{n \max} \cdot 100}{n \omega p_0 I_g}; \quad (\text{II, 31})$$

здесь $E_{n \max}$ — амплитуда напряжения соответствующей гармоники;
 p_0 — допустимая величина амплитуды n -й гармонической тока, выраженная в процентах от средней величины тока.

Обычно расчет проводится на гармоническую составляющую тока первой кратности $k=1$, так как амплитуды гармонических более высоких кратностей, как видно из табл. 2, быстро убывают. При применении фильтров по простейшей схеме, данной на фиг. 10, а, произведе-



Фиг. 10. а — схема с фильтром для сглаживания кривой выпрямленного тока; б — диаграмма тока и напряжения.

ние $L_g C$, рассчитанное на ограничение пульсации напряжения в пределах p_0 от средней величины, определяется по формуле [Л. VI, 9]

$$L_g C = \frac{E_{n \max} 100}{E_{g0} n^2 \cdot \omega^2 \cdot p_0}. \quad (\text{II, 32})$$

При установке фильтра в схемах, где в качестве вентиля стоят приборы, чувствительные к перегрузкам (как газотроны и тиратроны), необходимо обратить внимание на то, чтобы емкость в схеме не оказалась включенной до индуктивности, так как в этом случае могут получаться большие толчки зарядного тока. С этой целью необходимо также выбирать достаточно большим отношение $\frac{L_g}{C}$.

В схеме однополупериодного выпрямления обратное напряжение при наличии фильтра повышается почти в два раза, т. е. отношение $\frac{U_{обр}}{U_g}$ достигает значения 6,28. Для других схем повышение обратного напряжения при наличии фильтра сравнительно невелико [Л. VI, 1].

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

6. Выпрямитель с вращающимся коммутатором

Простейшим типом двухполупериодного выпрямителя является двух-пластинчатый коммутаторный выпрямитель, схематически представленный на фиг. 11.

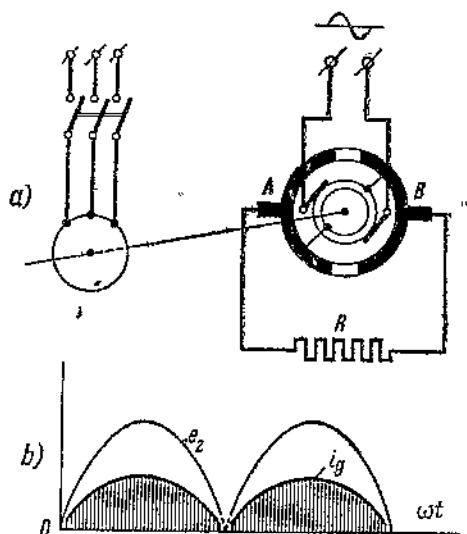
Переменный ток в данном выпрямителе подводится через две скользящих щетки к двум жестко насаженным на ось кольцам, электрически связанным с двумя пластинками коммутатора. Цепь выпрямленного тока присоединена к двум другим щеткам *A* и *B*. Коммутатор вращается синхронным двигателем с числом оборотов, соответствующим частоте источника переменного напряжения.

При чисто активном сопротивлении в цепи выпрямленного тока, когда нулевые значения тока и напряжения совпадают (фиг. 11, *b*), щетки *A* и *B*, допускающие пространственную перестановку, устанавливаются так, чтобы разрыв цепи происходил в момент, когда ток проходит через нуль. При наличии в цепи выпрямленного тока кроме активного сопротивления еще реактивных сопротивлений (индуктивного или емкостного, когда нулевые значения тока и напряжения перестают совпадать) щетки *A* и *B* устанавливаются в положение минимального искрения, соответствующего промежуточному моменту между нулевыми значениями тока и напряжения [Л. III, 1].

Искрение является органическим дефектом всех без исключения механических выпрямителей. Этим дефектом и определяется в основном предельная мощность, на которую такие выпрямители строятся.

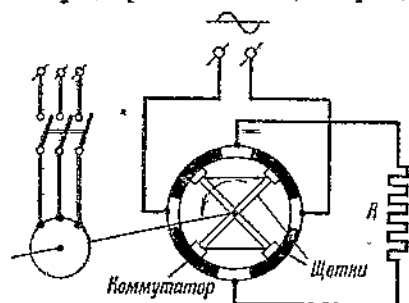
При однофазном (двухполупериодном) выпрямлении данный тип выпрямителя строится на токи до 5 А при напряжении выпрямленного тока до 120 В. Для получения больших мощностей коммутаторный выпрямитель выполняется с большим числом сегментов и питается от многофазной цепи. Наибольшие по мощности коммутаторные выпрямители, построенные фирмой Сименс и Гальске, выпрямляют токи до 50 А при напряжении выпрямленного тока 100—120 В.

Коэффициент полезного действия данного вида выпрямителя редко превосходит 50—60%.



Фиг. 11. *a* — механический коммутаторный выпрямитель; *b* — диаграмма токов и напряжений.

Другой модификацией коммутаторного выпрямителя является выпрямитель, называемый часто контактным, показанный на фиг. 12. Здесь коммутатор неподвижен, а вращаются щетки. Последние сидят на крестовине, закрепленной на валу приводного синхронного двигателя. Благодаря попарному электрическому соединению контактов крестовины нагрузочное сопротивление R получает все время ток одного направления.



Фиг. 12. Механический контактный выпрямитель.

Много общего с только что рассмотренным имеет искровой высоковольтный выпрямитель, применяемый для высоких напряжений (до 150 кВ) при малых токах (десятые доли ампера) [Л. III, 1].

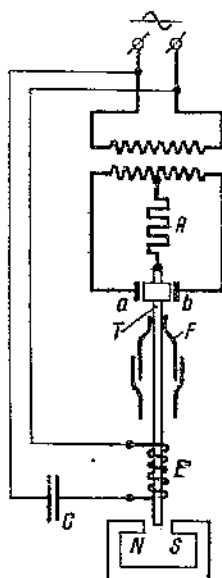
Коммутаторные сегменты этого выпрямителя значительно уже, чем у выпрямителя, представленного на фиг. 12, и, кроме того, контакты крестовины не прилегают плотно к коммутаторным сегментам, а отделены от них воздушным промежутком в 3—4 мм. Этот промежуток при приближении вращающихся контактов пробивается искрой, переходящей в дугу, которая затем при расхождении контактов вновь гаснет. Благодаря наличию электрического разряда этот выпрямитель можно считать занимающим промежуточное место между механическими и электрическими выпрямителями.

Данный тип выпрямителя находит применение в рентгентехнике и в пылеочистительных установках.

7. Вибрационный выпрямитель

Схема и устройство такого выпрямителя показаны на фиг. 13. Для выпрямления обеих полуwave взята схема с выведенным нулем у трансформатора. Качающийся маятник T в данном выпрямителе дает переменный контакт с пластинками a и b .

При контакте маятника с пластинкой a ток проходит через левую половину вторичной обмотки трансформатора и через цепь нагрузки R ; при контакте с пластинкой b ток проходит через правую половину этой обмотки и через цепь нагрузки в том же направлении. Маятник совершает колебания с периодичностью, равной периодичности выпрямляемого переменного тока. Это достигается воздействием на нижний конец маятника, помещенного в поле постоянных магнитов (NS), переменным магнитным полем от катушки L , питаемой от той же сети переменного тока, от которой питается и цепь



Фиг. 13. Механический вибрационный выпрямитель.

нагрузки. Собственные колебания механической системы, совпадающие с колебаниями в электрической системе, фиксируются пружинами F . С целью компенсации отставания по фазе механических колебаний системы по отношению к электрическим колебаниям и обеспечения разрыва цепи в моменты прохождения тока через нуль в цепь катушки включается конденсатор C [Л. III, 1].

Вибрационные выпрямители применяются, главным образом, для зарядки небольших аккумуляторных батарей с током до 10—15 А и напряжением до 30 В.

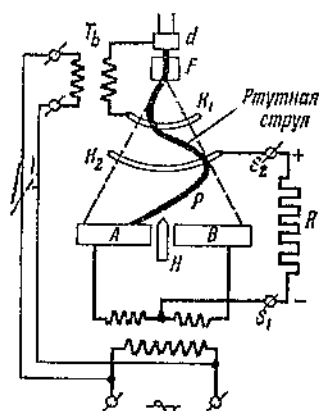
8. Механический выпрямитель с ртутной струей

Схема устройства и работы такого выпрямителя представлена на фиг. 14. По принципу действия ртутноструйный выпрямитель представляет собой логическое развитие ранее рассмотренного вибрационного выпрямителя.

В качестве колеблющегося маятника изобретатель данного выпрямителя проф. Гартман применил струю ртути P . Последняя осуществляет контакт между электродом K_2 , к которому присоединен один конец цепи нагрузки S_2 , и попеременно с одним из двух электродов A и B , к которым присоединены концы вторичной обмотки трансформатора. Нулевая точка трансформатора соединена с другим концом цепи нагрузки S_1 . Колебание струи ртути создается тем, что ртутная струя на начальном участке своего пути находится в поле постоянного магнита F и через струю ртути на участке $K_1 d$ проходит переменный ток от трансформатора возбуждения T_3 . Под действием первоначальной скорости и магнитного поля струя получает волнообразное движение с постепенно нарастающей амплитудой. Диаметр и начальная скорость струи подбираются с таким расчетом, чтобы в конце пути не получилось разрывов в струе ртути [Л. III, 3]. Подбором расстояния электродов A и B от электрода K_2 обеспечивается требуемая по условиям работы продолжительность касания струей электродов A и B . При переходе струи от одного электрода к другому она должна быстро и резко обрываться; в противном случае она замкнула бы накоротко оба электрода. Для резкого обрыва („отрезания“) струи служит изолированный нож H .

Описанный выпрямитель Гартмана может быть выполнен на мощность, заметно превосходящую мощность других типов механических выпрямителей. Отдельные экземпляры таких выпрямителей дают ток до 1 000 А при напряжении до 400 В.

Коэффициент полезного действия ртутноструйного выпрямителя колеблется в пределах от 92 до 95%.



фиг. 14. Ртутноструйный выпрямитель типа Гартман.

Ограниченное распространение данного типа выпрямителя объясняется отчасти теми конструктивными трудностями, с которыми связано создание данного выпрямителя, отчасти тем относительно невысоким диапазоном напряжений, при котором данный выпрямитель может еще надежно работать.

ГЛАВА IV

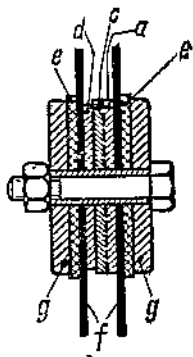
ТВЕРДЫЕ И ЖИДКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

9. Твердый выпрямитель

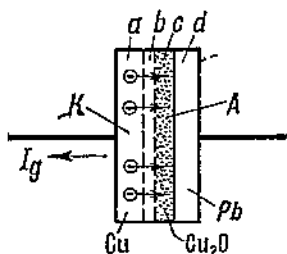
Существует несколько модификаций твердого выпрямителя [Л. IV, 1].

Наиболее распространенной из них является медно-оксидный выпрямитель, получивший в обиходе название купроксного выпрямителя. Устройство такого выпрямителя схематически показано на фиг. 15.

В подписи к фиг. 15 указаны основные детали выпрямительного устройства. Electroдами в данном выпрямителе являются пластинки a и d .



Фиг. 15. Меднооксидный выпрямитель. a — слой красной меди; c — слой закиси меди; d — свинцовая шайба; f — пластины для охлаждения; e — изоляция; g — нажимные плиты.



Фиг. 16. Схема действия меднооксидного выпрямителя. a — слой красной меди; b — непроводящий слой; c — слой закиси меди; d — свинцовая шайба.

Электрод a (катод) представляет собой пластинку из красной меди, поверхностный слой которой с превращен путем температурной обработки в закись меди Cu_2O .

Электрод d (анод) представляет собой свинцовую пластинку, посредством которой осуществляется контакт с слоем закиси меди. Рабочими электродами в полном смысле этого слова являются здесь слой чистой меди a и слой закиси меди c .

Закись меди Cu_2O представляет собой так называемый полупроводник, т. е. проводник с малой концентрацией легко освобождающихся электронов¹. При образовании закиси меди между этим слоем и слоем

¹ По современным воззрениям электронной теории электроны в металле нормально не свободны, а слабо связаны с ядром и освобождаются под действием самых незначительных электрических полей, появляющихся в металле.

красной меди образуется еще третий переходный слой толщиной порядка $10^{-5}—10^{-6}$ см, состоящий из третьего вещества, отличающегося настолько малой электропроводностью, что этот слой можно рассматривать как воздушный зазор. Природа этого переходного или запирающего слоя еще не вполне выяснена [Л. IV, 6].

Таким образом медная пластинка, покрытая закисью меди, содержит в себе три слоя, занумерованные на фиг. 16 буквами *a*, *b*, *c*. *a* — это слой чистой меди, содержащий легко освобождающиеся электроны в большой концентрации, слой *b* — переходный слой, почти не имеющий таких зарядов и, наконец, слой *c* — бедный легко освобождающимися электронами.

При сообщении разности потенциалов слоям *a* и *c* (последнему слою через свинцовую нажимную шайбу) в переходном слое образуется электрическое поле с большим градиентом. При толщине переходного промежутка порядка $10^{-5}—10^{-6}$ см величина градиента потенциала в этом слое достигает $10^5—10^6$ В/см, если напряжение между электродами равно 1 В.

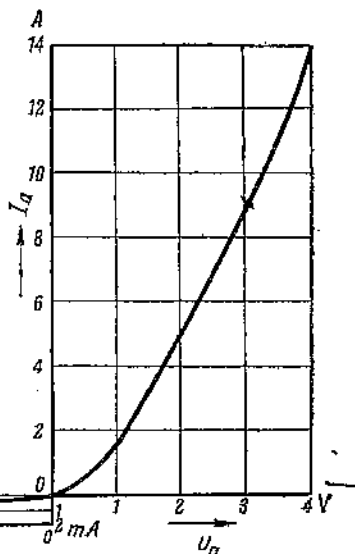
Физические исследования, произведенные Шоттке [Л. IV, 20], показали, что поле с таким градиентом в состоянии вырывать электроны даже из холодного металла,

Фиг. 17. Вольтамперная характеристика медно-оксидного выпрямителя.

причем число вырываемых с единицы поверхности электронов, примерно, пропорционально концентрации легко освобождающихся электронов в металле. Поэтому, когда слой *c* имеет положительный потенциал, а слой *a* — отрицательный, т. е. когда поле в переходном слое направлено таким образом, что оно вырывает электроны из меди, число вырываемых электронов, участвующих в переносе тока, будет настолько велико, что плотность тока на электродах достигает десятых долей ампера на 1 см^2 .

При обратной полярности на электродах, когда поле в переходном слое направлено таким образом, что оно должно вырывать электроны из закиси меди, имеющей небольшую концентрацию легко освобождающихся электронов, число электронов, вырываемых с 1 см^2 , будет также невелико. Плотность тока в этом случае при той же разности потенциалов на электродах в нормальных условиях работы не превосходит нескольких mA/cm^2 .

По условно принятому направлению для тока проводящим направлением для тока в данном выпрямителе надо, таким образом, считать направление от свинца к меди.



Вольтамперная характеристика, т. е. зависимость тока от напряжения на электродах, для купроксного выпрямителя показана на фиг. 17. Из этой характеристики видно, что проводимость выпрямителя в проводящем направлении нормально в тысячи раз больше проводимости в непроводящем направлении.

Ограничение тока в проводящем направлении обуславливается нагревом выпрямителя вследствие теряемой в переходном слое энергии.

Допускаемая плотность среднего значения тока колеблется в зависимости от условий охлаждения выпрямителя в пределах от 0,2 до 0,4 А/см². Амплитуда тока может достигать от 0,6 до 1,2 А/см² [Л. IV, 9].

Купроксные выпрямители обладают незначительной вентиляционной прочностью, поэтому величина допустимого обратного напряжения выбирается обычно в пределах от 3 до 5 В на каждый элемент.

При необходимости выпрямлять большие токи при более высоких напряжениях выпрямительные элементы, имеющие обычно небольшую рабочую площадь, собираются в последовательно-параллельные группы. Такие группы дают возможность применять купроксные выпрямители для получения выпрямленных токов до десятков и более ампер при напряжениях в несколько сот и более вольт.

В настоящее время отдельные

заграничные фирмы изготовляют твердые выпрямители, у которых запирающий и полупроводящие слои получают не термической обработкой пластин, а электролитическим путем [Л. IV, 11]. В этом случае рабочие поверхности пластин можно взять гораздо больше, и поэтому токи у выпрямительных групп, собранных из таких элементов, достигают сотен и даже тысяч ампер.

Наружный вид маломощного выпрямительного комплекта показан на фиг. 18. Металлические пластинки, выступающие в виде ребер из комплекта, служат для лучшего охлаждения выпрямителя. Выпрямитель может быть включен по любой из схем, описанных в § 3 и 4.

Число последовательно и параллельно соединяемых элементов, а также токи и мощности отдельных элементов схем определяют по заданным величинам выпрямленного тока и напряжения, пользуясь формулами § 3 и 4 и данными табл. 1.

Пример. Определить число выпрямительных элементов, коэффициент трансформации и мощность трансформатора в выпрямительной установке, которая должна обеспечить в цепи нагрузки ток $I_g = 6$ А, при напряжении $U_g = 50$ В. Питание выпрямительной установки производится от однофазной сети с напряжением $U_1 = 110$ В; нагрузка представляет собой чисто омическое сопротивление. Рабочая поверхность элементов $S = 15$ см².

Решение данной задачи мы проведем применительно к схеме Грэтца и к схеме с нулевым выводом у трансформатора.

Выбирая среднюю допустимую плотность тока на элемент

$$j = 0,2 \text{ A/cm}^2$$

и имея в виду, что среднее значение тока, проходящего через каждую группу из последовательно соединенных элементов в обеих указанных схемах при выпрямлении однофазного тока, в два раза меньше среднего значения полного рабочего тока (табл. 1), мы получаем, что число параллельных цепей в каждой ветви должно быть

$$\alpha = \frac{I_g}{2jS} = \frac{6}{2 \cdot 0,2 \cdot 15} = 1.$$

Число последовательно соединенных элементов мы определяем по максимальной величине допускаемого обратного напряжения. В схеме с нулевым выводом у трансформатора (табл. 1)

$$U_{обр} = 3,14 \quad E_{g0} = 3,14 \cdot 50 = 157 \text{ V};$$

в схеме Грэтца

$$U_{обр} = 1,57 \quad E_{g0} = 1,57 \cdot 50 = 78,5 \text{ V}.$$

Допуская 5 V обратного напряжения на элемент, мы получаем, что число последовательно соединенных элементов в схеме с нулевым выводом

$$n = \frac{U_{обр}}{5} = \frac{157}{5} \approx 32,$$

в схеме Грэтца

$$n' = \frac{78,5}{5} \approx 16.$$

Общее число элементов в выпрямительной установке в обеих схемах будет одинаково, поскольку в схеме Грэтца число выпрямительных ветвей будет в два раза больше, чем в схеме с нулевым выводом:

$$N = 2 \cdot n = 4n' = 64.$$

Фазовое напряжение вторичной обмотки трансформатора в обеих схемах будет

$$U_2 = \frac{E_{g0}}{0,90} = \frac{50}{0,90} = 55,5 \text{ V},$$

коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_1}{E_2} = \frac{110}{55,5} \approx 2,$$

мощность выпрямленного тока

$$P_g = E_{g0} I_g = 6 \cdot 50 = 300 \text{ W}.$$

Мощность трансформатора при схеме с нулевым выводом определяется по формуле (II,21):

$$P = 1,48 P_g = 1,48 \cdot 300 = 444 \text{ W},$$

при схеме Грэтца — по формуле (II,20'):

$$P = 1,23 P_g = 1,23 \cdot 300 = 370 \text{ W}.$$

Коэффициент полезного действия купроксного выпрямителя колеблется в пределах от 70 до 80%.

Применяются твердые выпрямители:

- а) для зарядки небольших аккумуляторных батарей;
- б) для питания электромагнитов;
- в) в измерительной технике;
- г) в автоматике;
- д) в схемах электросварки.

По сроку службы твердый выпрямитель превосходит большинство других известных типов маломощных выпрямителей.

10. Жидкий или электролитический выпрямитель

Электролитический выпрямитель состоит из двух металлических электродов (*K* и *A* на фиг. 19), пространство между которыми заполнено электролитом. Одним из электродов *A* может быть любой металл,

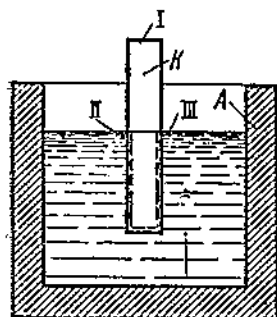
другим электродом должен быть такой металл, который в сочетании с данным электролитом обладает вентильным свойством. Таких металлов довольно много, но важнейшими из них являются: тантал *Ta*, обладающий вентильным свойством в сочетании со всеми без исключения электролитами; алюминий *Al*, обладающий вентильностью с большинством электролитов, и, наконец, магний *Mg*, обнаруживающий вентильные свойства лишь при немногих водных растворах [Л. IV, 18].

Теоретическая схема действия данных выпрямителей в основном не отличается от схемы действия твердых выпрямителей. Здесь рабочий процесс также протекает при наличии трех слоев: слой I представляет собой металл вентильного электрода с относительно большой

концентрацией свободных электронов, Слой III — это электролит с относительно малой концентрацией свободных заряженных частиц — ионов и, наконец, слой II — это газовая прослойка, образующаяся внутри пористого слоя окиси на границе между слоями I и II.

Газовая пленка играет здесь роль переходного слоя, в котором концентрируется электрическое поле с большими градиентами потенциала.

Пленка образуется одновременно с пористым слоем окиси на поверхности вентильного электрода во время предварительной подготовки



Фиг. 19.] Схематический разрез электролитического выпрямителя.

к действию выпрямителя — процесса, носящего название формовки выпрямителя. Толщина газовой пленки 10^{-4} — 10^{-5} см, что составляет примерно десятую часть толщины пористого слоя.

Получающийся в переходном слое градиент потенциала порядка 10^5 — 10^6 В/см при напряжении на электродах металл-электролит в несколько десятков вольт в состоянии вырывать значительное количество электронов из металла и сравнительно небольшое число ионов из электролита. Поэтому в течение той части периода переменного напряжения, когда вентильный металл имеет отрицательный потенциал по отношению к электролиту, через цепь проходит значительно больший ток, нежели в ту часть периода, когда вентильный металл получает положительный потенциал по отношению к электролиту. Формовка выпрямителя производится путем пропускания постоянного по величине и направлению тока через вентиль в непроводящем направлении. Этот процесс требует определенного времени, в течение которого напряжение на электродах выпрямителя растет по характерной кривой, представленной на фиг. 20.

На первых двух участках кривой OA и AB напряжение на электродах растет пропорционально времени, а затем оно мало изменяется, достигая в конце формовки максимальной величины. Точка A , соответствующая первому излому кривой, характеризуется появлением искорок у вентильного электрода, которые затем по мере роста напряжения увеличиваются, приобретая у точки B несколько иной оттенок.

Точка B есть точка, определяющая запирающее напряжение выпрямителя. Абсолютная величина этого напряжения зависит в значительной мере от концентрации раствора. При ослаблении концентрации раствора величина запирающего напряжения повышается. Но одновременно уменьшается и проводимость электролита; в результате у вентиля повышается падение напряжения в проводящем направлении, что в свою очередь ведет к увеличению потерь в вентиле и к значительному выделению тепла.

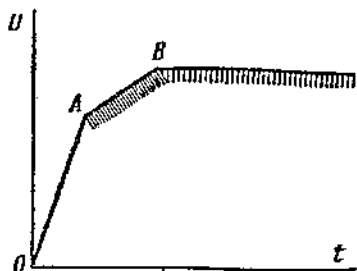
Исходя из этого, концентрация электролита берется такой, чтобы не получилось слишком больших напряжений ни для проводящего, ни для запирающего направлений.

Из электролитических выпрямителей, которые получили некоторое применение на практике могут быть названы следующие:

1. **Алюминиевый выпрямитель.** У данного выпрямителя электродами служат алюминий Al и железо Fe , а электролитом — углекислый аммоний. Такой выпрямитель допускает нагрузку током до 2—3 А при выпрямленном напряжении 30—40 В.

Внешний вид выпрямителя показан на фиг. 21.

2. **Танталовый выпрямитель.** У танталового выпрямителя электродами служат тантал (вентильный металл) и свинец, электролитом —



Фиг. 20. Кривая формовки электролитического выпрямителя.

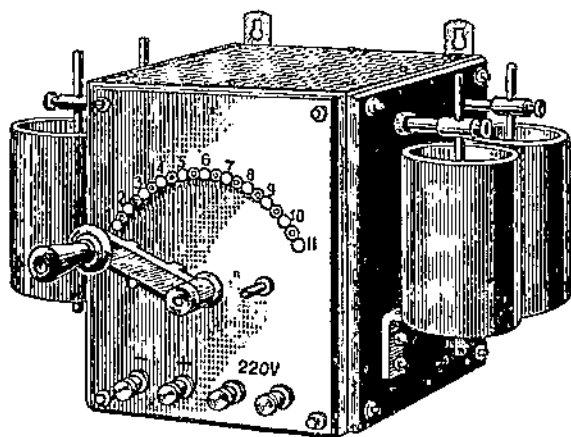
серная кислота, к которой примешивается слабый раствор железного купороса для предохранения тантала от вредного действия выделяющегося во время работы водорода. Выпрямитель допускает нагрузки током до 2 А при напряжении до 20—30 В [Л. IV, 19].

3. Железный выпрямитель. У данного выпрямителя электродами являются свинец и сталь (вентильный металл), электролитом — 50% раствор серной кислоты.

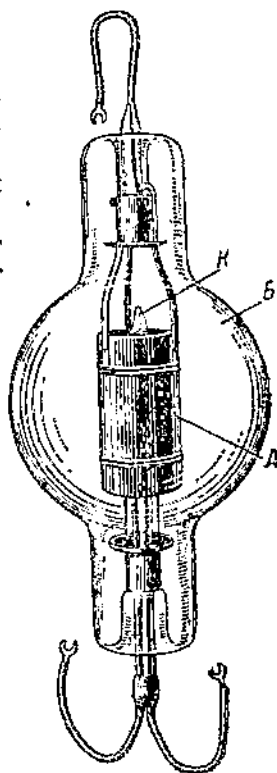
Коэффициент полезного действия жидких выпрямителей весьма невелик, он колеблется в пределах от 15 до 30%.

Включение жидких выпрямителей производится преимущественно по схеме Грэтца.

Общим недостатком электролитических выпрямителей является то, что они не допускают повышения температуры сверх 50—60°С.



Фиг. 21. Электролитический выпрямитель.



Фиг. 22. Электронный выпрямитель.

ГЛАВА V

ВАКУУМНЫЕ ИЛИ ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

11. Устройство и принцип действия

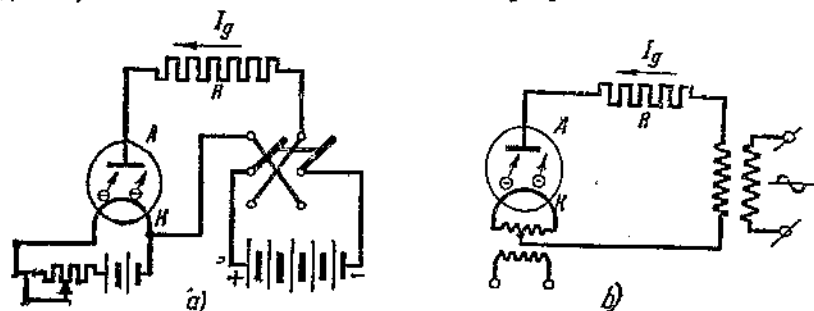
Вакуумный или электронный выпрямитель представляет собой (фиг. 22) герметически закрытый, обычно стеклянный баллон *Б* с введенными в него двумя электродами: анодом *А* и катодом *К*. Воздух из баллона предварительно выкачивается до давления 10^{-6} — 10^{-7} мм *Hg* (мм ртутного столба), что составляет примерно 10^{-9} — 10^{-10} атмосферного давления. Один из электродов выпрямителя — *К* накаливается вспомогательным источником тока ¹, для того чтобы под действием

¹ Например, аккумулятором или трансформатором накала, как показано на фиг. 23.

высокой температуры этот электрод мог излучать электроны в окружающую среду (термо-электронный ток). Второй электрод — анод A — остается холодным.

Такой прибор может работать в качестве электрического вентиля, т. е. пропускать ток только в одном направлении.

Действительно, если к холодному электроду — аноду A такого прибора (фиг. 23, a) присоединить положительный, а к катоду — отрицательный полюс источника тока (что соответствует нижнему положению переключателя на фиг. 23, a), то под действием электрического поля (силы которого по отношению к электронам направлены от катода к аноду) электроны, выходящие из катода, устремляются к аноду. При том высоком вакууме, который в данном выпрямителе создается, плотность оставшегося в баллоне разреженного газа настолько



Фиг. 23. a — схема действия вакуумного (электронного) выпрямителя; b — схема однополупериодного выпрямления с электронным выпрямителем.

невелика, что электроны, являющиеся носителями тока в данном выпрямителе, пробегают от катода к аноду, почти не сталкиваясь с молекулами оставшегося газа, и цепь тока оказывается замкнутой. Если изменить полярность на электродах (поставив переключатель на фиг. 23, a в верхнее положение), то поле в приборе будет иметь обратное направление, и в силу этого электроны, выходящие из катода, возвращаются к нему обратно. Цепь тока оказывается в этом случае не замкнутой. Таким образом ток через прибор может проходить только тогда, когда анод положителен по отношению к катоду. Если такой прибор включить в цепь с переменным напряжением (фиг. 23, b), то ясно, что ток через прибор будет проходить только в течение одного (положительного) полупериода напряжения; в течение другого (отрицательного) полупериода ток в цепи проходить не может.

По схеме фиг. 23, b мы получаем однополупериодное выпрямление тока. Увеличивая число приборов и усложняя схему, мы можем получить выпрямление тока в любой многофазной системе (см. § 20 и 32).

12. Свободный пробег молекул и электронов

Рассмотрение с количественной стороны работы выпрямителя начнем с уточнения характеристики вакуума в разрядных трубках, применяемых в качестве электронных и ионных выпрямителей. Степень достигнутого

вакуума определяется не абсолютно малым количеством молекул газа в единице объема [так как даже при максимально достижимом в настоящее время разрежении (10^{-7} — 10^{-8} мм Hg) число молекул в единице объема остается еще достаточно большим (10^8 — 10^9 молекул на см^3)], а так называемым свободным пробегом λ , под которым понимается расстояние, пробегаемое молекулой или электроном от одного столкновения до другого. Так как молекулы в газе находятся в состоянии беспорядочного движения, то они имеют различные свободные пути пробега. Степень разреженности газа определяется по среднему свободному пробегу, представляющему собой среднеарифметический из всех возможных свободных пробегов молекулы.

Согласно выводам кинетической теории газов средний свободный пробег молекулы (в см) может быть определен по формуле (Л. V, 1)

$$\lambda = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r^2 n}, \quad (\text{V}, 1)$$

где n — число молекул в 1 см^3 ;

r — радиус молекулы в см.

Для электронов согласно той же теории средний свободный пробег в $4\sqrt{2}$ раз больше.

Из формулы (V,1) следует, что длина среднего свободного пробега обратно пропорциональна плотности газа n , следовательно, при заданной температуре и объеме газа обратно пропорциональна давлению газа:

$$\lambda = \frac{c}{p}; \quad (\text{V}, 2)$$

здесь c — постоянная;

p — давление газа.

Имея в виду, что при нормальных условиях (0°C и 760 мм Hg) число молекул в единице объема для любого газа $N = 2,67 \cdot 10^{19}$ в 1 см^3 и что радиус молекулы составных частиц воздуха примерно равен $1,5 \cdot 10^{-8}$ см, мы получаем, что свободный пробег для молекул воздуха при нормальных условиях будет весьма близок к величине $1 \cdot 10^{-6}$ см.

ТАБЛИЦА 3
Средние свободные пробеги в воздухе

Давление в мм Hg	760	1	0,1	0,01	0,001	10^{-5}	10^{-6}
λ молекул воздуха в см	$1 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-2}$	0,76	7,6	760	7600
λ электронов в см	$5 \cdot 65 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	0,43	4,3	43,0	4300	43000

При других давлениях в газе длина среднего свободного пробега будет изменяться обратно пропорционально давлению. Численные зна-

чения среднего свободного пробега для молекул воздуха приведены во второй строке табл. 3. В третьей строке той же таблицы даны свободные пробеги для электронов.

Достигнутый вакуум можно считать высоким (вакуумные трубки), если свободный пробег намного больше расстояния между электродами. В такой трубке, как мы уже говорили, электроны проходят от катода к аноду без столкновения. Если свободный пробег не намного больше (или, тем более, меньше) расстояния между электродами, то часть электронов сталкивается с молекулами газа при прохождении электронов от катода к аноду. Такую трубку называют не вакуумной трубкой, а трубкой газового разряда, хотя по существу вакуум в ней и может быть достаточно высок. Так, например, табл. 3 показывает нам, что при расстоянии между электродами порядка нескольких сантиметров мы получаем вакуумную трубку при разрежении порядка 10^{-5} — 10^{-6} мм Hg, а при переходе к более высоким давлениям, как, например 10^{-2} — 10^{-3} мм Hg мы получаем трубки газового разряда¹.

13. Скорость электронов в электрическом поле

По выходе электронов из катода они попадают в электрическое поле, созданное между анодом и катодом внешним источником напряжения. При положительном потенциале анода по отношению к катоду электроны под действием сил поля направляются к аноду. Так как путь для электронов свободен (свободный пробег больше расстояния между электродами), то работа сил электрического поля тратится исключительно на ускорение движения электронов, т. е. на увеличение их кинетической энергии, что может быть выражено формулой

$$eU_e = \frac{m_e v_e^2}{2}, \quad (V,3)$$

где e — заряд электрона;

U_e — пройденная электроном разность потенциалов;

m_e — масса электрона;

v_e — скорость, приобретенная электроном на рассматриваемом участке поля.

Если принять начальную скорость электронов по выходе их из катода равной нулю, то абсолютная скорость в любой промежуточной точке между электродами может быть определена по формуле

$$v_e = \sqrt{\frac{2eU_e}{m_e}}. \quad (V,4)$$

Подставляя в найденное равенство отношение заряда электрона к его массе и выражая v_e в км/сек, а U_e в вольтах, мы получаем

$$v_e \approx 590 \sqrt{U_e}. \quad (V,4')$$

¹ Более точно вакуумную трубку или трубку газового разряда можно было бы определить по виду разряда, который имеет место в таких трубках.

Как видно из формулы (V,4'), скорость электрона может быть определена по пройденной электроном разности потенциалов, будучи пропорциональной $\sqrt{U_e}$.

Это дает возможность скорость движения электронов характеризовать вольтами.

Проводя вычисление скорости электронов для ряда значений U_e , мы получаем табл. 4.

ТАБЛИЦА 4
Скорости электронов v_e в зависимости от пройденной разности потенциалов U_e

U_e в вольтах	0,1	1	4,5	10	100
v_e в km/sec	186	590	1 260	1 900	5 900

14. Тепловые скорости молекул и электронов. Закон распределения Максвелла

До выхода из катода электроны, помимо направленного движения под действием электрического поля, участвуют наравне с молекулами в тепловом движении.

Из кинетической теории газов мы знаем, что в хаотическом тепловом движении молекул газа одни скорости являются более вероятными, другие менее. Скорость, которую имеет наибольшее число молекул газа, содержащихся в данном объеме, носит название наиболее вероятной или наивероятнейшей скорости. Распределение скоростей между отдельными группами перемещающихся частиц характеризуется формулой Максвелла [Л. V, 4)

$$F = \frac{4}{\sqrt{\pi}} x^2 e^{-x^2}. \quad (V,5)$$

Здесь F — вероятность данной скорости x ,

а $x = \frac{v}{w}$ определяет рассматриваемую скорость в долях от наивероятнейшей скорости — w .

На фиг. 24 уравнение (V,5) изображено графически. По оси абсцисс у данной кривой отложены скорости в долях от наиболее вероятной, а по оси ординат вероятность именно данной скорости.

Максимальной ординате на кривой Максвелла соответствует абсцисса с $v = w$.

По мере отклонения от наивероятнейшей скорости в обе стороны число молекул, имеющих соответствующие скорости, убывает.

Наивероятнейшая скорость, как доказывается в кинетической теории газов, может быть подсчитана по формуле [Л. V,4]

$$w = 1,29 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (V,6)$$

где T — абсолютная температура газа в $^{\circ}\text{K}$;

M — молекулярный вес газа.

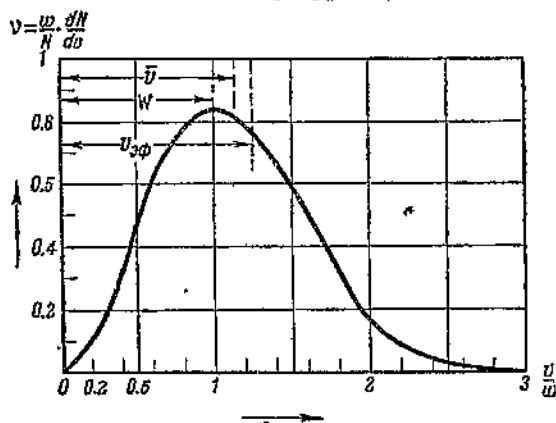
Так как для воздуха $M=28$, то при комнатной температуре ($T=300^{\circ}\text{K}$)

$$w = 1,29 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{300}{28}} = 4,2 \cdot 10^4 \text{ cm/sec.}$$

Поскольку шкала на оси абсцисс в кривой Максвелла дается в долях от w , то, найдя для данного газа и температуры w , мы можем переписать шкалу на оси абсцисс в единицах абсолютной скорости. Для воздуха, при $T=300^{\circ}\text{K}$, максимум по кривой Максвелла соответствует наивероятнейшей скорости $w=420 \text{ m/sec}$.

Пользуясь кривой Максвелла, мы можем подсчитать также абсолютное число молекул, которые имеют скорости, лежащие в заданном диапазоне.

Для воздуха это распределение скоростей в интервалах через каждые 100 m/sec приведены в табл. 5 [Л. V, 7].



Фиг. 24. Кривая распределения скоростей газовых молекул по Максвеллу.

ТАБЛИЦА 5

Диапазон скорости в м/сек	0—100	100—200	200—300	300—400	400—500	500—600	600—700
Число молекул в % имеющих данную скорость	1	8	15	20	21	17	10

Кроме наивероятнейшей скорости в электронно-ионных процессах нас еще интересуют определяемые также по кривой Максвелла:

1) средняя скорость молекул, представляющая собой среднеарифметическую из скоростей всех молекул [Л. V, 4]:

$$\bar{v} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} w = 1,13 w, \quad (\text{V}, 7)$$

2) среднеквадратичная скорость, определяющая собой среднюю кинетическую энергию молекул:

$$v = \sqrt{\frac{3}{2}} w, \quad (\text{V}, 8)$$

Со средней скоростью среднеквадратичная скорость связана формулой [Л. V, 4]

$$v = \sqrt{\frac{3\pi}{8} \bar{v}}. \quad (V,8')$$

Ординаты, соответствующие $\bar{v}$ и v , также отмечены на кривой фиг. 24.

15. Испускание электронов накалившимся катодом

Как известно, металлы состоят из кристаллической решетки, содержащей кроме атомов еще и некоторое число положительных ионов и свободных электронов.

Электроны, образующие электронный газ, движутся в промежутках между кристаллической решеткой по тем же примерно законам, по которым совершается тепловое движение газовых молекул в содержащем их сосуде ¹.

Выходу электронов из металла за стенки его поверхности мешает согласно теории, разработанной Зоммерфельдом, потенциальный барьер, который имеется у поверхности любого металла.

Распределение потенциала внутри этого барьера таково, что поле внутри него мешает выходу электронов из металла. Высота и форма этого барьера зависят от природы металла и состояния его поверхности.

Средняя кинетическая энергия, которую нужно сообщить электрону, чтобы он вышел за пределы металла, носит название работы выхода. Обозначим ее через ϕ .

ТАБЛИЦА 6
Работа выхода ϕ для разных металлов

Металл	Работа выхода в вольтах	Металл	Работа выхода в вольтах
Натрий	2,38—2,34	Железо	4,79—3,92
Калий	2,02—0,46	Никель	4,57—3,68
Цезий	1,86—0,7	Молибден	4,33—3,22
Кальций	3,34—1,7	Тантал	4,92—4,12
Барий	2,29—1,59	Вольфрам	5,36—4,31
Медь	4,82—3,89	Оксид бария на никеле	1,0
Ртуть	4,75—4,05	Торированный вольфрам	2,62
		Вольфрам с пленкой цезия	1,36

Измеряется ϕ или в вольтах или в вольтахэлектронах. Последняя единица представляет собой энергию, которую получает электрон, пройдя в свободном пространстве разность потенциалов, равную 1 V.

¹ См. примечание к стр. 28.

В пересчете на абсолютную систему измерений CGS-E 1 вольт-электрон $= \frac{1}{300} 4,77 \cdot 10^{-10} = 1,59 \cdot 10^{-12} \text{ e}$ ($1 \text{ V} = \frac{1}{300} \text{ CGS-E}$, а $4,77 \cdot 10^{-10}$ — заряд электрона, выраженный в единицах CGS-E)¹.

Значения φ для интересующих нас металлов, полученные опытным путем, приведены в табл. 6 [Л. V, 4].

Исходя из того: 1) что каждой температуре металла отвечает определенная величина среднего значения кинетической энергии электрона

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{3}{2} kT, \quad (\text{V,9})$$

2) что выход электрона из металла возможен только тогда, когда его кинетическая энергия больше работы выхода

$$\frac{m_e v_e^2}{2} > e\varphi,$$

и наконец, 3) учитывая распределение скоростей для электронов по кривой Максвелла, Ричардсон вывел формулу [Л. V, 4] (впоследствии более строго обоснованную Дешманом), которая дает возможность определить число электронов n , излучаемых единицей поверхности металла в единицу времени при заданной температуре накала катода в °K:

$$n = A_1 T^2 e^{-\frac{B}{T}}; \quad (\text{V,10})$$

здесь A_1 и B — постоянные, определяемые родом металла.

Умножая число n на заряд электронов e , мы получаем плотность излучаемого накаленным проводником тока или плотность тока эмиссии:

$$j = ne = AT^2 e^{-\frac{B}{T}}. \quad (\text{V,10}')$$

Для ряда чистых металлов постоянная A в данной формуле является универсальной постоянной, и если j определять в A/cm^2 , то $A = 60,2 \text{ A/cm}^2 \text{ } ^\circ \text{K}^2$. Для металлических сплавов и окислов величина A имеет другие численные значения, приведенные в табл. 7 [Л. V, 4]. В этой

ТАБЛИЦА 7
Значения констант A и B для формулы Ричардсона-Дешмана

Металл	A в $\text{A/cm}^2 \text{ } ^\circ \text{K}^2$	B в $^\circ \text{K}$
Вольфрам	60,12	52 500
Молибден	60,2	51 300
Торий массивный	70	39 400
Пленка тория на вольфраме	3,0	30 500
Кальций	—	26 000
Катод, покрытый окисью бария	$3 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	11 500

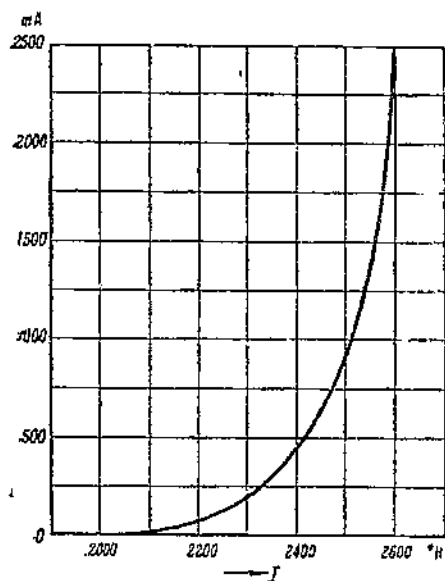
¹ e — обозначение эрга (ОСТ 6052).

же таблице приведены значения второй постоянной B , пропорциональной работе выхода электрона из данного металла:

$$B = \frac{e\varphi}{k}. \quad (V,11)$$

Отступления в значениях A для некоторых металлов и сплавов объясняются тем, что поверхности этих тел не эмитируют равномерно всей своей поверхностью, а только отдельными точками.

Изменение численного значения множителя A в формуле Ричардсона-Дешмана оказывает на величину плотности тока значительно меньшее влияние, чем изменение числового значения коэффициента B , входящего в показатель степени.



Фиг. 25. Кривая тока эмиссии вольфрамового катода.

Из этой кривой мы видим, что до температур порядка 2000°K ток эмиссии ничтожно мал. При более высоких температурах кривая начинает резко возрастать.

Для торированных и оксидированных катодов начальные температуры заметного излучения электронов лежат значительно ниже, чем у вольфрама. Верхняя граница допускаемых температур определяется обычно для катодов температурой испарения металла.

Нагрев катода производится обычно, как указывалось выше, электрическим током, проходящим через катод от независимого источника тока. Регулируя ток накала, мы тем самым регулируем температуру накала катода и, следовательно, ток эмиссии.

Так, например, для катода из вольфрама, имеющего $A = 60,2$ и $B = 52\,500$, для получения плотности тока в 100 mA/cm^2 нужна температура $T = 2200^\circ \text{K}$; для вольфрама же, пропитанного торием (торированный катод), с $A = 3,0$ и $B = 30\,500$ ту же плотность тока мы получаем при $T = 1\,275^\circ \text{K}$. Для никеля, покрытого оксидом бария (оксидированный катод), с $A = 3 \cdot 10^{-4}$ и $B = 11\,500$ такую же плотность тока мы получаем при еще более низкой температуре, и именно при $T = 800^\circ \text{K}$.

Зависимость тока эмиссии от температуры для вольфрама характеризуется кривой, представленной на фиг. 25.

16. Связь между током и напряжением в электронном выпрямителе (уравнение Лангмюра-Чайльда)

В вакууме на пути движения электронов нет препятствий в виде нейтральных молекул. Исходя из этого, казалось бы, что прохождение тока через вакуум должно быть связано с весьма небольшим падением напряжения в межэлектродном пространстве. В действительности же мы наблюдаем обратное: напряжение, которое нужно приложить к электродам вакуумного прибора, чтобы обеспечить ту или иную величину тока, должно быть значительно больше напряжения, требуемого для проведения того же тока через металлический проводник. Объясняется это тем, что электроны проходящего через трубку тока создают в разрядном пространстве трубки отрицательный объемный заряд. В силу этого между катодом и данным объемным зарядом создается электрическое поле, препятствующее дальнейшему движению электронов по направлению к аноду. Поэтому внешний источник тока должен создавать между анодом и катодом не только поле, требующееся для перемещения зарядов от катода к аноду, но еще компенсировать отрицательное поле, созданное объемным зарядом у катода.

Так как составляющая внешнего поля, компенсирующая отрицательный объемный заряд (образуемый при прохождении тока через вакуумную трубку), значительно больше составляющей поля, перемещающей заряд [Л. V, 2], то напряжение на электродах трубки должно быть значительно больше, чем напряжение на концах аналогичного металлического проводника, в котором поле затрачивается только на перемещение зарядов.

Количественное соотношение между током и напряжением в вакуумной трубке можно найти, исходя из теоремы Пуассона, связывающей изменение потенциала с пространственным зарядом в электрическом поле [Л. V, 8]:

$$\nabla^2 U = -4\pi\rho. \quad (V,11)$$

В трубке с плоскими электродами, линейные размеры которых (в направлении, перпендикулярном к оси) велики по сравнению с расстоянием между электродами, уравнение Пуассона, записанное в прямоугольной системе координат с началом координат у катода и осью абсцисс, направленной по оси трубки, принимает вид

$$-\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 4\pi\rho. \quad (V,11')$$

В этом уравнении U связано с плотностью заряда ρ . Нам же нужно связать U с j , но

$$j = \rho v,$$

где v — скорость перемещения зарядов, определяемая по формуле (V, 4),

$$v_e = \sqrt{\frac{2eU_e}{m_e}}.$$

Подставляя значение ρ и v_e в уравнение (V, 11'), мы получаем дифференциальное уравнение, связывающее ток с разностью потенциалов.

Решение данного уравнения дает нам соотношение, связывающее плотность тока с напряжением в трубке при плоских электродах [Л. V, 6]:

$$j_e = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2}. \quad (V,12)$$

Это уравнение получено Лангмюром и Чайльдом.

Здесь j_e — плотность анодного тока в CGS-E;

U — разность потенциалов между электродами в CGS-E;

d — расстояние между электродами в см;

e и m_e — заряд и масса электрона в CGS-E.

При подстановке значений e и m_e в уравнение и при переходе к практическим единицам это уравнение принимает вид

$$j_e = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2}. \quad (V,12')$$

Уравнение Лангмюра-Чайльда показывает:

1) что ток в вакуумной трубке пропорционален не первой степени напряжения (как это имеет место в законе Ома для металлических проводников), а степени $\frac{3}{2}$;

2) что с изменением расстояния между электродами d напряжение между электродами при прочих равных условиях повышается пропорционально не первой степени от d , а степени $\frac{4}{3}$ от него;

3) что числовой коэффициент пропорциональности $2,33 \cdot 10^{-6}$, если его в какой-то мере можно сравнивать с удельной электропроводностью, значительно меньше, чем у металлических проводников.

В результате мы получаем, что даже при небольших рабочих токах и незначительных расстояниях между электродами d падение напряжения в приборе относительно велико.

Так, например, если расстояние между электродами взять равным 1 см, а плотность тока $j = 0,01$ А/см², то для обеспечения такого тока требуется напряжение 264 В.

На практике мы чаще встречаемся не с плоской формой электродов, а с цилиндрической, показанной на фиг. 22. Здесь катодом служит цилиндрическая нить, а окружающий ее коаксиальный цилиндр служит анодом.

Решая уравнение Пуассона для данной конфигурации электродов, Лангмюр пришел к формуле, которая для практических единиц записывается так [Л. V, 2]:

$$j_e = 14,65 \cdot 10^{-6} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{r_a \beta^2}; \quad (V,13)$$

здесь j_e — плотность тока в амперах на погонный сантиметр нити;

r_a — радиус анодного цилиндра в см;

β — поправочный коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода $\frac{r_a}{r_k}$. Значения β приведены в табл. 8 [Л. V, 3].

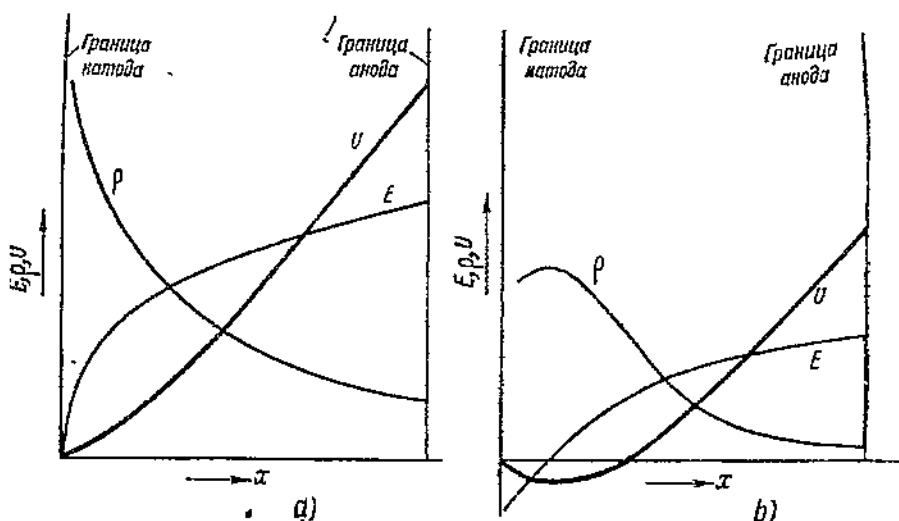
ТАБЛИЦА 8
Значения коэффициента β в уравнении (V,13)

$\frac{r_a}{r_k}$	2	4	6	8	10	15
β	0,275	0,665	0,818	0,902	0,940	0,978

Так как в реальных конструкциях ламп отношение $\frac{r_a}{r_k}$ не меньше 15, то практически принимают $\beta = 1$.

17. Распределение потенциала в межэлектродном пространстве

Распределение потенциала в пространстве между электродами мы можем найти аналитически, если по уравнению Лангмюра-Чайльда для



Фиг. 26. Кривые потенциалов, напряженности поля и плотности зарядов электронной лампы. а — ток нагрузки равен току эмиссии; б — ток нагрузки меньше тока эмиссии.

различных значений d при неизменном j найдем соответствующие потенциалы U . Построенная таким способом кривая распределения потенциалов между катодом и анодом показана на фиг. 26, а (кривая U).

Как видно из рисунка, кривая потенциалов идет, резко повышаясь по мере приближения к аноду. Пользуясь кривой потенциалов и зная, что

$$E = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad (\text{V},14)$$

мы можем построить кривую напряженности поля. Эта кривая (кривая *E* на фиг. 26, *a*), начиная с нулевого значения у катода, идет постепенно повышаясь.

Если в пространстве между электродами не было бы отрицательного объемного заряда, то распределение поля в трубке было бы такое же, как в плоском конденсаторе или в металлическом проводнике с током. Напряженность поля характеризовалась бы в этом случае прямой, параллельной оси абсцисс, а потенциал — наклонной прямой.

Поскольку в данном частном случае

$$-4\pi r = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = -\frac{\partial E}{\partial x}, \quad (V, 11')$$

то, дифференцируя кривую напряженности поля, мы можем найти и кривую распределения объемного заряда.

Из построенной кривой для ρ (по фиг. 26, *a*) видно, что плотность зарядов убывает по мере приближения к аноду. Это объясняется тем, что ток $j = nv$ во всех сечениях трубки одинаков, а скорость электронов по направлению к аноду непрерывно возрастает вследствие непрерывного ускоряющего действия поля.

Кривые на фиг. 26, *a* относятся к случаю, когда все электроны, вышедшие из катода, уходят к аноду, т. е. к случаю, когда нагрузочный ток внешней цепи равен току эмиссии с катода.

Если ток эмиссии больше тока, требуемого для внешней цепи, то у катода создается избыточный отрицательный объемный заряд (электронное облако), который несколько меняет кривые распределения потенциала и напряженности поля в пространстве между электродами. Кривые для этого случая представлены на фиг. 26, *b*. Здесь кривая потенциалов снята опытным путем, а кривые напряженности поля и плотности заряда построены по кривой потенциалов путем геометрического дифференцирования.

Характерная особенность кривой потенциалов заключается в том, что кривая имеет минимум. Он лежит недалеко от катода, в области электронного облака. Кривая напряженности поля в силу этого начинается с отрицательных значений. Уход электронов к аноду возможен в этом случае благодаря тому, что начальная кинетическая энергия, которую имеют электроны, покидающие катод, достаточна для того, чтобы они преодолели как потенциальный барьер, так и тормозящее действие электрического поля вблизи катода. Электроны, которые не имеют такого начального запаса энергии, возвращаются обратно к катоду.

Таким образом в области, примыкающей к катоду, устанавливается состояние подвижного (динамического) равновесия, при котором часть электронов, выбрасываемых катодом, возвращается обратно, а часть, участвующая в переносе тока, уходит к аноду.

18. Характеристики электронного выпрямителя

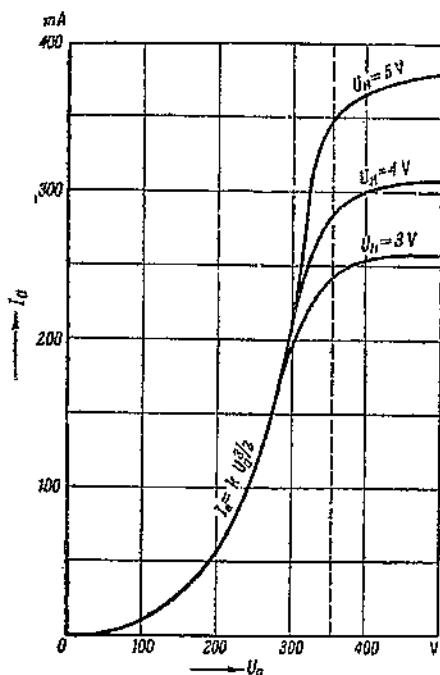
Для данного выпрямителя нас практически интересуют две характеристики:

1) изменение тока в выпрямителе в зависимости от напряжения на электродах $I_a = f(U_a)$ при данной температуре накала катода $T_k = \text{const}$;

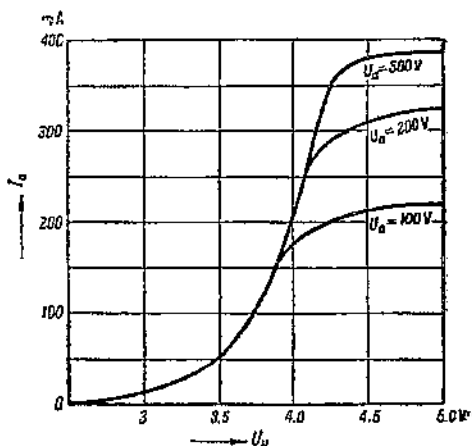
2) изменение тока в зависимости от температуры накала катода $I_a = \varphi(T_k)$ при данном напряжении на электродах $U_a = \text{const}$.

Первую характеристику $I_a = f(U_a)$ мы можем получить из уравнения Лангмюра, подсчитывая для разных значений U_a соответствующие значения для тока I_a . Построив графически такую зависимость, мы получаем (теоретическую) вольтамперную характеристику для электронной трубки, приведенную на фиг. 27 (кривая $I_a = k U_a^{3/2}$).

Действительные характеристики $I_a = f(U_a)$ совпадают с теоретической только на начальном участке кривой, а затем, начиная с определенных точек, зависящих от температуры накала катода, они начинают отклоняться и идут почти параллельно оси абсцисс (насыщение).



Фиг. 27. Вольтамперные характеристики электронной лампы.



Фиг. 28. Кривые анодного тока в электронной лампе в зависимости от напряжения накала катода.

[Л. V, 3]. Это обуславливается тем, что нагрузочный ток достигает максимально возможного значения тока эмиссии, т. е. состояния, когда все электроны, выбрасываемые катодом, уходят к аноду. Так как ток эмиссии определяется температурой катода, то каждой температуре катода отвечает свой участок насыщения; он лежит тем выше, чем больше температура накала катода.

На фиг. 27 показаны три ветви, соответствующие разным напряжениям в цепи накала ($U_h = 3, 4$ и 5 V), а следовательно, и разным температурам катода.

Вторую характеристику электронной лампы (фиг. 28) мы можем получить, пользуясь уравнением Ричардсона, определяющим $j_a = \varphi(T_k)$ или $j_a = \varphi'(U_h)$

Действительные характеристики $I_a = \psi(T_k)$ также имеют пологий участок [Л. V, 3], показывающий, что ток в трубке прекращает свой рост, несмотря на дальнейшее повышение температуры катода. Это объясняется тем, что при заметном превышении током эмиссии тока нагрузки возрастающий объемный отрицательный заряд у катода возвращает избыток электронов обратно к катоду.

Естественно, что чем больше напряжение между анодом и катодом, тем выше лежит пологий участок характеристики.

19. Конструкция и типы электронных выпрямителей

Наиболее важной деталью, определяющей рабочие характеристики и срок службы электронного выпрямителя, является катод.

Качество катода определяется:

1) удельной эмиссией, характеризующей величину термоэлектронного тока в миллиамперах, который может безвредно отдавать катод с каждого кв. сантиметра своей поверхности;

2) экономичностью катода, характеризуемой величиной термоэлектронного тока, который дает катод на каждый ватт мощности, затрачиваемой на накал;

3) продолжительностью службы катода.

В электронных трубках в настоящее время применяются следующие типы катодов [Л. V, 6]:

1) катоды из чистого вольфрама;

2) торированные катоды;

3) оксидированные катоды.

1. Вольфрамовый катод имеет сравнительно незначительную удельную эмиссию 3 mA/cm^2 и небольшую экономичность — от 5 до 10 mA/W . Этот катод обладает устойчивой эмиссией, большой теплостойкостью и механической прочностью. Рабочая температура катода колеблется в пределах $2400—2600^\circ \text{K}$. Срок службы вольфрамового катода, определяемый временем, в течение которого диаметр нити катода уменьшается на 10% , исчисляется примерно в 1000 час. работы катода.

2. Торированный катод состоит из вольфрама, содержащего примесь окиси тория в количестве не более $1—2\%$. Эмиссия у данного катода происходит из мономолекулярного (одномолекулярного) слоя тория, покрывающего поверхность вольфрама. При израсходовании в процессе эмиссии данного слоя из глубин вольфрама диффундируют к поверхности новые молекулы тория. Таким образом, пока в вольфраме имеется достаточный запас тория, пленка на катоде непрерывно восстанавливается. Эмиссионная способность у такого катода значительно выше, чем у катода из чистого вольфрама: удельная эмиссия торированного катода колеблется в пределах от 30 до 100 mA/cm^2 . Экономичность торированного катода также выше, чем у вольфрамового. Температура накала данного катода обычно около 1900°K . Срок службы его около 800 час.

3. Наиболее экономичным из современных катодов является оксидный катод, состоящий из металлического ядра, обычно никеля с нанесенным на него активным слоем из углекислых солей бария, стронция и кальция.

После прокалики катода в процессе изготовления вакуумного прибора на катоде остается активный оксидный слой, обладающий высокой эмиссионной способностью. Раньше полагали, что высокая эмиссионная способность данного катода обусловлена мономолекулярным слоем земельных металлов, выделяющихся из окислов, например, чистого бария, располагающегося на поверхности оксида. Последние исследования [Л. VI, 14] показали, что более вероятным является предположение, что мономолекулярный слой располагается под оксидным слоем непосредственно на поверхности зерна. При этом пористые слои оксида выходу электронов из мономолекулярного активного слоя не мешают.

Оксидные катоды уже при температуре $700-800^{\circ}\text{C}$ способны давать высокую удельную эмиссию, достигающую до $50-150 \text{ mA/cm}^2$. Экономичность их также выше, чем у других катодов. Она колеблется в пределах от 50 до 100 mA/W .

В силу высокой эмиссионной способности данный катод является наиболее распространенным типом катода, применяемым в электронных трубках.

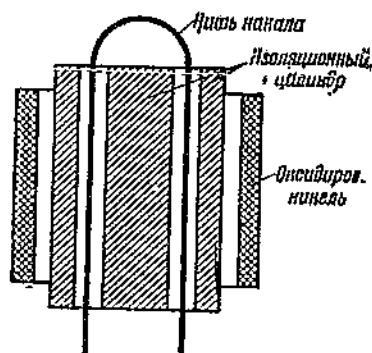
Конструктивно катоды выполняются в двух модификациях: а) катод с непосредственным подогревом и б) катод с косвенным подогревом (фиг. 29). В последнем типе катода эмитирующая часть отделена от подогревной части. Эмитирующая часть, состоящая из металлического цилиндра с активным слоем, насаживается на изоляционный цилиндр, а часть подогревная, обычно вольфрамовая нить, располагается внутри цилиндра. Тепло, полученное подогревной нитью от тока накала, передается изоляционному цилиндру, а от последнего — металлическому цилиндру с активным слоем.

Это дает то преимущество, что такой катод может быть выполнен эквипотенциальным и, кроме того, его накал можно производить переменным током нормальной частоты, что для катодов с непосредственным подогревом не всегда допустимо. Удельная эмиссия катода с косвенным подогревом обычно несколько меньше, чем у катодов с непосредственным подогревом.

Срок службы оксидных ламп завода „Светлана“ около 1 000 час.

Аноды в электронных лампах должны быть выполнены из теплостойкого материала, так как во время работы аноды нагреваются благодаря потоку энергии, получаемой ими от приходящих к ним электронов, участвующих в переносе тока. Всю кинетическую энергию, накопленную электронами при прохождении от катода к аноду, анод должен рассеять.

Материал анода не должен содержать также веществ примесей, легко испаряющихся в вакууме при нагревании, и наконец, материал анода должен легко обезгаживаться для того, чтобы не портить вакуум. Чаще всего аноды в электронных лампах выполняются из никеля, реже из молибдена.



Фиг. 29. Катод электронной лампы косвенного подогрева.

Охлаждение анода в выпрямителях малой мощности происходит путем естественной теплоотдачи. В мощных лампах приходится применять искусственное охлаждение анодов, пользуясь для этого проточной водой.

Формы и размеры баллона электронных трубок определяются, во-первых, геометрическими размерами системы электродов лампы и, во-вторых, количеством рассеиваемого через излучение тепла. При обыкновенном стекле и отсутствии искусственного охлаждения поверхность баллона выбирается из расчета удельной отдачи примерно от 0,15 до 0,2 W/cm² стекла.

Выбор сорта стекла для баллона определяется требованиями хорошего обезгаживания и подбором одинаковых коэффициентов теплового расширения для стекла и металлических вводов, соединяющих электроды с токоподводящими внешними клеммами. Впай вводов в стекло должен обеспечить полную газонепроницаемость, что представляет одну из технических трудностей выполнения электронных трубок.

ТАБЛИЦА 9
Тип электронных выпрямителей завода „Светлана“

Маркировка типа	ВТ-14	В-16	В-17	В-22	В-24	В-25	В-38	ВО-116	ВО-125
Материал катода	Вольфрам							Оксидированный никель (косвенный по- догрев)	
Напряжение накала в В	3,25	12,0	11,0	15,0	16,0	17,0	16,4	4	4
Ток накала в А	0,5	6,2	3,45	8,4	10,2	18	54	2,0	0,8
Ток эмиссии в мА	60	280	200	600	1 000	1 800	15 000	150	50
Материал анода	Никель								
Рабочее напряжение в В	150	350	1 500	8 000	1 000	10 000	10 000	500	300
Наибольшая мощность рассеивания анодом в W	2	15	40	200	300	600	10 000	10	2

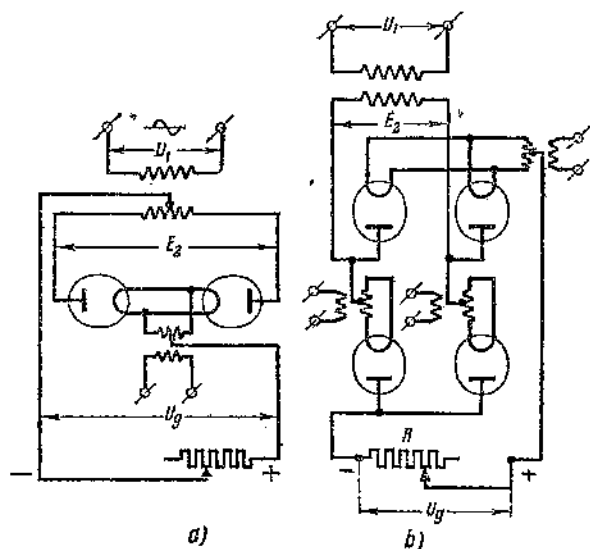
Степень разрежения в трубках современного устройства доводится до 10^{-7} — 10^{-8} мм Hg. Удаление газа, оклюдированного стенками и электродами, производится разогревом их до высоких температур. Дальнейшая степень разрежения достигается при помощи введения в прибор особых поглотителей „геттеров“, магния, натрия, кальция,

бария, которые, распыляясь в лампе, уносят к стенкам следы газов и особенно кислорода.

В табл. 9 приведены основные типы двухэлектродных выпрямительных ламп (кенотронов) изготовленного завода „Светлана“ с указанием наиболее важных их характеристик [Л. V, 9].

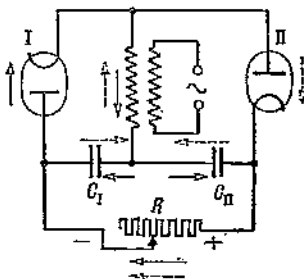
20. Схемы включения электронных выпрямителей

Двухэлектродные лампы-кенотроны, применяющиеся для выпрямления тока, могут быть включены по одной из схем, описанных в § 3 и 4. Схема двухполупериодного выпрямления с выводом нулевой точки



Фиг. 30. Схемы однофазного выпрямления тока приборами с накалившимся катодом. *a* — схема с выводом нулевой точки трансформатора; *b* — схема Грэтца.

у трансформатора повторена для электронного прибора на фиг. 30, *a*, а соединение по схеме Грэтца дано на фиг. 30, *b*. На этих схемах помимо рабочей цепи показана также и цепь накала катодов.



Фиг. 31. Схема двухполупериодного выпрямления тока (Лятура).

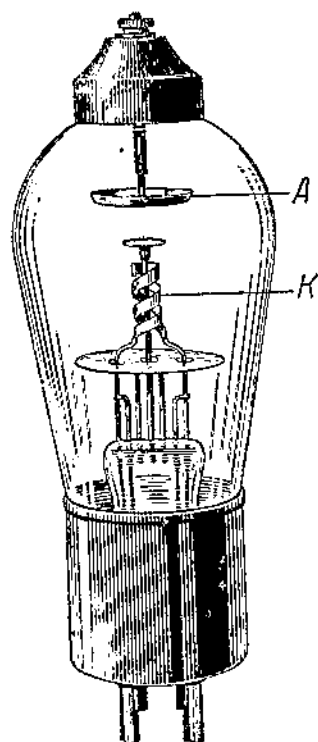
Большой практический интерес при выпрямлении высоких напряжений представляет схема двухполупериодного выпрямления Лятура, приведенная на фиг. 31. Наличие конденсаторов в данной схеме позволяет увеличить выпрямленное напряжение примерно в два раза против того, которое дает нормальная схема двухполупериодного выпрямления. Принцип действия этой схемы заключается в следующем: в течение одного полупериода, когда ток идет по направлению, указанному сплошной стрелкой, работает кенотрон *I*, в течение другого полупериода (пунктирная стрелка) работает кенотрон *II*. При работе кенотрона *I* заряжается конденсатор C_1 , а C_2 разряжается, будучи заряжен в предыдущую полуволну, когда работал кенотрон *II*.

Так как напряжение на конденсаторе примерно равно напряжению вторичной обмотки, то в результате цепь выпрямленного тока получает почти двойное напряжение.

ГАЗОТРОНЫ

21. Устройство и принцип действия

Газотрон, как и электронный прибор, представляет собой (фиг. 32) герметически закрытый стеклянный или металлический сосуд, в котором помещены два электрода: 1) холодный (металлический или угольный) анод *A* и 2) накаливаемый независимым источником тока катод *K*.



Фиг. 32. Газотрон завода
„Светлана“.

Газотрон отличается от электронного прибора тем, что баллон его после разрежения в нем воздуха до предельно возможного вакуума (10^{-5} — 10^{-6} мм Hg) заливается парами ртути (ртутные газотроны) или же инертным газом: аргоном, неонов, гелием.

Газовое заполнение, определяющее собой название прибора, коренным образом меняет рабочий процесс. Прохождение тока через данный прибор связано с наличием в межэлектродном пространстве, как это ниже выяснится, не только электронов, но и положительных ионов. Эти ионы получаются при столкновениях электронов, направляющихся к аноду, с нейтральными атомами газа. Наличие ионов в межэлектродном пространстве определяет принадлежность данного типа выпрямителей к ионным приборам.

Так как основными носителями и в ионном приборе остаются электроны (§ 24, а) выходящие из катода, то ток через ионный прибор может проходить только тогда, когда анод положителен по отношению к катоду. При обратной полярности электроны, излученные катодом, возвращаются обратно и ток через прибор проходить не может.

Техническое применение данный тип прибора получил сравнительно недавно (1928 г.) благодаря работам американского инженера

Хелла (Л. VI, 3), исследовавшего работу накаливаемого катода при газовой разряде.

По сравнению с двухэлектродным вакуумным прибором (кеноном) газотрон обладает рядом преимуществ, из которых главное заключается в уменьшении падения напряжения в проводящем направлении.

22. Плотность газа или пара в баллоне газотрона

Рабочий режим газотрона находится в большой зависимости от плотности газа или пара, заполняющего баллон газотрона. Плотность газа, как известно, может быть выражена массой газа в единице объема:

$$d = \frac{m}{V}. \quad (\text{VI}, 1)$$

Выражая правую часть этого равенства по законам Бойля-Мариотта и Ге-Люссака через давление и температуру газа, мы получаем

$$d = \frac{m}{V} = \frac{p}{R'T}, \quad (\text{VI}, 1')$$

здесь $R' = \frac{R}{M}$ — газовая постоянная, отнесенная к 1 г газа (M — молекулярный вес газа);

T — абсолютная температура газа в $^{\circ}\text{K}$;

p — давление в $\text{дин}/\text{см}^2$.

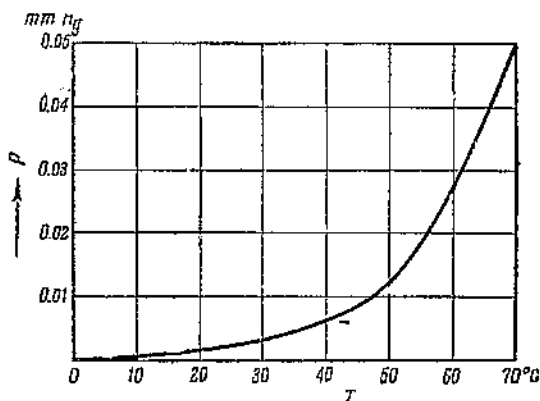
В газотронах с инертным газом плотность газа задается давлением при известной температуре газа.

Пределы давления выбираются в зависимости от рода и назначения прибора от десятых долей мм Hg (газотроны высокого напряжения) до нескольких мм Hg (газотроны низкого напряжения).

Масса газа в газотронах с инертным газом является величиной постоянной (если пренебречь абсорбцией газа стенками сосуда), и поэтому средняя плотность газа остается величиной неизменной при любом изменении температурного режима колбы. При неравномерном распределении температуры по отдельным объемам внутри газотрона плотность газа распределяется обратно пропорционально местным температурам.

В ртутных газотронах внутрь баллона вводится небольшое количество (несколько грамм) ртути. Образующиеся пары заполняют все пространство газотрона, причем давление паров можно считать всюду одинаковым. При неодинаковой температуре внутри баллона ртутные пары оказываются насыщенными только там, где их температура не превосходит температуру свободной поверхности ртути.

Поэтому давление паров в сосуде определяется по температуре жидкой ртути, а плотность — по уравнению (VI, 1').



Фиг. 33. Кривая давления ртутных паров, насыщающих пространство.

¹ дн — обозначение дини (ОСТ 6052).

Зависимость между температурой и давлением для ртутных паров, насыщающих пространство, дана в табл. 10 [Л. VI, 17], а также иллюстрируется кривой фиг. 33. Кривая и таблица показывают, что давление в сосуде очень сильно зависит от изменения температуры жидкой ртути.

ТАБЛИЦА 10

Давление ртутных паров, насыщающих пространство

Температура в °C	0	20	40	60	80	100	120
Давление в мм Hg	0,0004	0,0013	0,006	0,03	0,09	0,28	0,8

Для того чтобы удержать изменения давления паров ртути при работе газотрона в определенных границах, необходимо принять меры к тому, чтобы температура жидкой капли ртути была по возможности менее зависимой от рабочей температуры в межэлектродном пространстве.

С этой целью колба ртутного газотрона снабжается внизу удлиненной цилиндрической частью (фиг. 50), называемой обычно катодной горловиной. На дне этой горловины лежит капля ртути, удаленная от непосредственного воздействия тепла, выделяемого на электродах и в межэлектродном пространстве, благодаря чему удастся удержать температуру и давление паров в сосуде газотрона в определенных границах. Так как температура в шаровой части колбы обычно заметно выше температуры горловины, то ртутные пары в межэлектродном промежутке пространства не насыщают.

Для представления того, как изменяются плотности газа ртутных паров с изменением температуры в газотронах, рассмотрим следующий пример:

Пример. Газотрон с объемом в шаровой части 100 см^3 , а в катодной горловине — 30 см^3 заполнен в одном случае неоном, а в другом случае — ртутными парами. При нагрузке газотрона током в 1 А катодная горловина нагревается до 40°C , а шаровая часть до 150°C . При этом давление неона $p = 1 \text{ мм Hg}$. При подъеме нагрузки до 2 А температура нижней части колбы повышается до 50°C , а шаровой части — до 200°C . Определим плотность неона и паров ртути в газотроне при указанных режимах нагрузки, а также минимальный объем ртути, который должен быть введен в ртутный газотрон, чтобы при максимальном температурном режиме в баллоне еще оставалась жидкая ртуть.

а) Неоновый газотрон. Молекулярный вес неона $M = 20,2$. Приведенная к 1 г универсальная постоянная

$$R' = \frac{R}{M} = \frac{8,32 \cdot 10^7}{20,2} = 4,12 \cdot 10^6 \text{ е/г}^\circ \text{K}.$$

Массу газа в каждом из объемов определяем по формуле (VI, 1'), переводя единицы давления из мм Hg в дн/см²:

$$1 \text{ мм Hg} = \frac{4}{3} \cdot 10^3 \text{ дн/см}^2.$$

В объеме a (шаровая часть сосуда) масса газа равна

$$m_{1a} = \frac{p_{1a} V_a}{R T_{1a}} = \frac{1000 \cdot \frac{4}{3} \cdot 100}{4,12 \cdot 10^6 \cdot 423} = 7,65 \cdot 10^{-5} \text{ г.}$$

В объеме b (катодная горловина) масса газа равна

$$m_{1b} = \frac{p_{1b} V_b}{R T_{1b}} = \frac{1000 \cdot \frac{4}{3} \cdot 30}{4,12 \cdot 10^6 \cdot 313} = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ г.}$$

Масса газа во всем сосуде будет

$$m = m_{1a} + m_{1b} = 10,75 \cdot 10^{-5} \text{ г.}$$

Плотность газа в объеме a

$$d_{1a} = \frac{m_{1a}}{V_a} = \frac{7,65 \cdot 10^{-5}}{100} = 7,65 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^3.$$

Плотность газа в объеме b

$$d_{1b} = \frac{m_{1b}}{V_b} = \frac{3,1 \cdot 10^{-5}}{30} = 10,33 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^3.$$

При переходе к нагрузке в 2 А благодаря новому соотношению в распределении температур изменится не только общее давление в сосуде, но по-иному перераспределятся и плотности газа в отдельных объемах газотрона. Массы газа в отдельных объемах при двухамперной нагрузке мы можем определить в зависимости от неизвестного пока давления p_2 :

$$m_{2a} = \frac{p_2 \cdot 100}{4,12 \cdot 10^6 \cdot 473} = 5,13 \cdot 10^{-8} p_2,$$

$$m_{2b} = \frac{p_2 \cdot 30}{4,12 \cdot 10^6 \cdot 323} = 2,255 \cdot 10^{-8} p_2.$$

Мы имеем два уравнения с тремя неизвестными (m_{2a} , m_{2b} и p_2).

Третье уравнение мы можем написать, исходя из того, что масса газа в сосуде остается неизменной:

$$m_{2a} + m_{2b} = 10,75 \cdot 10^{-5}.$$

Решая совместно три уравнения, мы получаем:

$$p_2 = 1457 \text{ дн/см}^2 = 1,092 \text{ мм Hg},$$

$$d_{2a} = \frac{5,13 \cdot 10^{-8} \cdot 1457}{100} = 7,48 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^3,$$

$$d_{2b} = \frac{2 \cdot 255 \cdot 10^{-8} \cdot 1457}{30} = 10,95 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^3.$$

б) Ртутный газотрон. При температуре нижней части колбы T_{1b} 40°C по табл. 10 находим $p_1 = 6 \text{ }\mu \text{ Hg}$.

При температуре $T_{2b} = 50^\circ \text{C}$ по кривой фиг. 33 находим $p_2 = 12 \text{ }\mu \text{ Hg}$.

При молекулярном весе ртути $M = 200,6$ универсальная постоянная ртути, отнесенная к 1 г, будет

$$R' = \frac{R}{M} = \frac{8,32 \cdot 10^7}{200,6} = 4,164 \cdot 10^5 \text{ е/}^\circ\text{K}.$$

Масса ртутных паров в объеме a при нагрузке в 1 А

$$m_{1a} = \frac{p_1 V_a}{R' T_{1a}} = \frac{\frac{4}{3} \cdot 6 \cdot 100}{4,16 \cdot 10^5 \cdot 423} = 4,55 \cdot 10^{-6} \text{ г},$$

а плотность

$$d_{1a} = \frac{m_{1a}}{V_a} = \frac{4,55 \cdot 10^{-6}}{100} = 4,55 \cdot 10^{-8} \text{ г/см}^3.$$

При нагрузке в 2 А масса ртутного пара в объеме a будет

$$m_{2a} = \frac{\frac{4}{3} \cdot 12 \cdot 100}{4,16 \cdot 10^5 \cdot 473} = 8,13 \cdot 10^{-6} \text{ г},$$

а плотность

$$d_{2a} = \frac{8,13 \cdot 10^{-6}}{100} = 8,13 \cdot 10^{-8} \text{ г/см}^3.$$

Нижняя часть колбы при нагрузке в 1 А имеет массу пара

$$m_{1b} = \frac{p_{1b} \cdot V_b}{R' T_{1b}} = \frac{4,3 \cdot 6 \cdot 30}{4,16 \cdot 10^5 \cdot 313} = 1,842 \cdot 10^{-6} \text{ г},$$

а плотность

$$d_{1b} = \frac{m_{1b}}{V_b} = \frac{1,842 \cdot 10^{-6}}{30} = 6,14 \cdot 10^{-8} \text{ г/см}^3.$$

При нагрузке в 2 А масса газа

$$m_{2b} = \frac{\frac{4}{3} \cdot 12 \cdot 30}{4,16 \cdot 10^5 \cdot 323} = 3,57 \cdot 10^{-6} \text{ г},$$

а плотность

$$d_{2b} = \frac{3,57 \cdot 10^{-6}}{30} \approx 11,9 \cdot 10^{-8} \text{ г/см}^3.$$

Минимальный необходимый объем ртути мы определим, исходя из двухамперного режима:

$$V = \frac{m_{2a} + m_{2b}}{\gamma} = \left(\frac{8,13 + 3,57}{13,6} \right) \cdot 10^{-6} = 8,61 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3.$$

Из решения данной задачи мы видим, что плотность газа в газотроне, наполненном неонем, с изменением температуры почти не изменяется, между тем как плотность паров в ртутном газотроне при том же изменении температур возросла довольно значительно. Особенно это коснулось объема b , являющегося для газотрона рабочим пространством. Количество требуемой ртути для ртутного газотрона, как показывает результат решенной задачи, ничтожно мало.

23. Ионизация газа электронным ударом

Переходя к рассмотрению явлений в разрядном пространстве газотрона, сопровождающих процесс прохождения тока через прибор, необходимо предварительно остановиться на явлениях возбуждения и ионизации молекул газа.

Известно, что в нейтральном состоянии атом любого вещества состоит из положительного ядра и вращающихся вокруг него по разным орбитам электронов. Число орбит и число движущихся по ним электронов определяется порядковым номером элемента в периодической системе Менделеева. Наибольшее значение с точки зрения определения физико-химических свойств элементов имеют электроны, вращающиеся по наружной периферической орбите. С этой орбиты электрон может быть переведен на орбиты, более удаленные от ядра (неустойчивое состояние), или же вовсе удален из данной атомной системы.

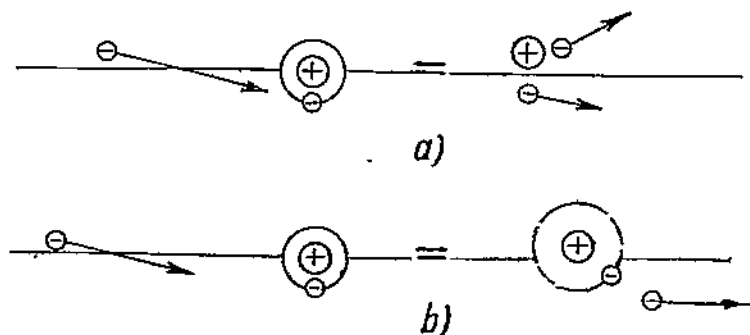
Первый процесс — нарушение устойчивой системы атома, носит название возбуждения атома, второй процесс носит название ионизации атома. Как для возбуждения, так и для ионизации требуется затрата определенного количества энергии. Эта энергия может быть сообщена нейтральному атому или лучом света (фотоэффект) или же ударом другой частицы, отдающей нейтральному атому свою кинетическую энергию (ионизация толчком).

Так как для изучения процесса разряда в ионных приборах практическое значение имеет, главным образом, ионизация толчком, то на кратком рассмотрении этого явления мы сейчас и остановимся.

Ионизация толчком в процессе газового разряда создается электронами, ускоряемыми электрическим полем, при их столкновении с нейтральными атомами газовой среды. На фиг. 34 схематически показан процесс ионизации и возбуждения, происходящий при столкновении электронов с нейтральными атомами.

Фиг. 34, *a* изображает случай, когда энергия, которой располагает ударяющий электрон, достаточно велика, чтобы оторвать электрон от нейтральной молекулы. В этом случае имеет место ионизация, и в результате мы имеем положительный ион и вторичный электрон.

При меньшем запасе энергии не получается отрыва электрона от нейтрального атома, а только перемещение электрона с периферической орбиты на более удаленную от ядра нестационарную орбиту, т. е. происходит только возбуждение атома. Этот случай иллюстрирует фиг. 34, *b*.



Фиг. 34. Схема возбуждения и ионизации атома электронным ударом. *a* — ионизация; *b* — возбуждение.

Наконец, если энергия ударяющего электрона недостаточна даже для возбуждения нейтрального атома, в результате упругого столкновения электрона с атомом происходит лишь обмен энергиями, как при столкновении упругих шаров.

Энергия электрона определяется скоростью, приобретенной им к моменту удара, а последняя может быть в свою очередь определена по разности потенциалов, пройденной ударяющим электроном в электрическом поле. Поэтому минимальное количество энергии, необходимое для ионизации, определяют „потенциалом ионизации“, а минимальное количество энергии, необходимое для возбуждения, определяют „потенциалом возбуждения“.

Значения потенциалов ионизации и возбуждения для ряда интересующих нас газов приведены в табл. 11 [Л. VI, 2].

В состоянии возбуждения атом обладает большей энергией, чем в нейтральном состоянии. Эту энергию он получает от ударяющего электрона. В зависимости от того, насколько удалена от ядра та нестационарная орбита, на которую попадает электрон возбужденного атома, энергия, переданная возбужденному атому, будет различна.

Состояние возбуждения в общем случае не является устойчивым. Через промежуток времени порядка 10^{-7} — 10^{-8} сек. возбужденный атом возвращается в нормальное состояние. При этом энергия, затраченная на возбуждение атома, излучается в окружающее пространство в виде лучистой энергии. У атомов некоторых элементов возможны и более длительные задержки (10^{-2} — 10^{-4} сек.) электронов на нестационарных орбитах. Такой возбужденный атом называется метастабильным атомом.

Выход из метастабильного состояния возможен после получения или отдачи метастабильным атомом некоторой новой порции энергии при следующем столкновении с другим электроном, ионом или атомом. В зависимости от знака добавочной энергии возможен или последующий возврат к нормальному состоянию или же окончательная ионизация атома. В последнем случае мы имеем ионизацию ступенями. При ионизации ступенями один ударяющий электрон переводит атом в метастабильное состояние, а другой или ряд других электронов ионизируют атом. Такая ионизация ступенями может производиться электронами, имеющими потенциалы, меньшие потенциала ионизации.

ТАБЛИЦА 11
Потенциалы возбуждения и ионизации

Газ	Потенциал возбуждения в V	Потенциал ионизации в V
Гелий . .	13,73	24,48
Неон . . .	16,60	21,47
Аргон . .	11,57	15,69
Ртуть . .	4,66	10,4

При рассмотрении явлений ионизации и возбуждения необходимо иметь в виду, что не каждый электрон, достигающий скорости, соответствующей потенциалу возбуждения или ионизации, обязательно возбуждает или ионизирует атом. Могут происходить столкновения, при которых электрон как бы „проходит“ сквозь атомную систему, не задевая электронов этой системы. Здесь имеется определенная вероятность процесса, характеризуемая отношением числа действительно произведенных возбуждений или ионизаций к общему числу встреч между атомами и электронами, имеющими потенциал, не меньший, чем потенциал возбуждения или ионизации.

Как показал ряд исследований, вероятность возбуждения и ионизации является функцией скорости ударяющего электрона.

В табл. 12 [Л. VI, 2] приведены значения вероятности ионизации и возбуждения для разных газов. Эта вероятность определена числом ионизаций, которые дает ударяющий электрон на 1 см его пути в газе при $p = 1 \text{ mm Hg}$ и 0° C . Полное число столкновений электрона с атомами на 1 см пути мы можем определить путем деления 1 см на длину свободного пути электрона в газе. Последние значения приведены в табл. 12 также для давления $p = 1 \text{ mm Hg}$ и температуры 0° C . Для ртутных паров, у которых температура и давление связаны таблицей для паров, насыщающих пространство, данные таблицы относятся только к $p = 1 \text{ mm Hg}$. Максимумы количества ионизаций на 1 см пути в таблице выделены жирным шрифтом.

В пространстве, где находятся свободные ионы и электроны, возможен и обратный процесс, а именно восстановление нейтрального атома из электрона и положительного иона, или, как говорят, рекомбинация. Рекомбинация сопровождается отдачей энергии в виде тепла

ТАБЛИЦА 12

Число ионизаций на 1 см пути, произведенных одним электроном

Газ	Свободный пробег при $p = 1 \text{ mm Hg}$	Иониза- ционный потенциал в В	Энергия ионизирующего электрона в вольтэлектронах					
			20	30	50	300	500	1 000
Гелий . . .	0,1203	24,5	0,00	0,25	0,86	11,25	0,97	0,49
Неон . . .	0,0753	21,5	0,00	0,48	1,47	2,66	2,71	1,29
Аргон . . .	0,0431	15,7	3,07	8,4	11,7	12,9	8,6	3,66
Ртуть . . .	0,0142	10,4	8,1	13,7	17,9	19,3	14,6	7,30

или лучистой энергии в зависимости от того, где рекомбинация происходит, на стенках сосуда или в свободном пространстве.

В некоторых газах кроме процесса рекомбинации возможно соединение электрона и с нормальными атомами. В этом случае получаются отрицательные ионы. Наличие таких ионов в разрядном промежутке газовых приборов чрезвычайно вредно отзывается на рабочем режиме прибора (так как они мешают положительным ионам компенсировать отрицательный заряд электронов). Поэтому возможность образования таких ионов следует всячески предупреждать. Этим объясняется то, что баллоны газотронов (после возможно полного удаления из них частиц воздуха и других посторонних газов, способных образовывать отрицательные ионы) заполняются инертным газом или парами ртути, не способными образовывать отрицательных ионов. Инертные газы и ртуть обладают также и другим важным преимуществом — в них не могут окисляться электроды, что чрезвычайно важно для нормальной работы ионных приборов.

24. Явления в межэлектродном пространстве

Межэлектродное пространство в газотроне при прохождении тока может быть разбито на три области (фиг. 35, *a*): 1) область у катода (d_K); 2) средний участок, занятый столбом дуги l (или положительным столбом, как его часто называют, в силу исторически сложившейся, но неправильной терминологии), 3) участок у анода (d_A).

Такое разделение определяется электронно-ионным процессом, происходящим внутри каждой из этих областей, и характером кривой распределения потенциала вдоль разрядного пространства. Кривая потенциалов в межэлектродном пространстве показана на фиг. 35, *b*. Соответственно названным выше областям на данной кривой также различают: 1) катодное падение напряжения, определяемое участком первого подъема кривой; 2) падение напряжения в столбе, определяемое пологим участком кривой потенциалов; 3) анодное падение напряжения, определяемое одним из трех вариантов возможного хода кривой (1, 2, 3).

Рассмотрим явления в каждой из выделенных областей более подробно начиная с среднего участка, наиболее характерного для ионного разряда

электронными. В последнем, как мы видели, отсутствие компенсации отрицательного объемного заряда приводило к большому падению напряжения между электродами даже при незначительных токах и малых расстояниях между электродами. Здесь же благодаря компенсации объемного отрицательного заряда, создаваемого электронами, мы получаем для прохождения тока, примерно, те же условия, что и в электрических проводниках. Поэтому в приборах с ионным разрядом при любых допускаемых размерах разрядной трубки токах и любых расстояниях между электродами падение напряжения остается незначительным.

Это падение напряжения обуславливается, главным образом, теми потерями энергии, которые имеют место в столбе из-за уноса энергии из плазмы ионами и электронами [Л. VI, 4], которые в известной доле уходят из плазмы к стенкам, где они рекомбинируются (см. п. „b* настоящего параграфа), и отчасти энергией, отдаваемой образующимися в плазме возбужденными атомами в виде света в окружающее пространство.

Градиент потенциала, обусловленный указанными потерями энергии, обычно невелик, и поэтому движение зарядов в плазме идет не столько под действием направленного электрического поля, сколько хаотически, в связи с непрерывными столкновениями зарядов, как и молекул, друг с другом. При этом является существенным отметить то, что рекомбинация (соединение ионов с электронами) в межэлектродном пространстве при тех давлениях, которые имеют место в газотронах, почти не происходит.

Сложные пути движения зарядов в плазме, в частности, электронов, являющихся основными носителями, как мы ниже увидим, рабочего тока в плазме, Лангмюр, наиболее подробно исследовавший процессы в плазме, рассматривает по тем двум компонентам, которые обуславливают это движение [Л. VI, 4]: 1) направленное движение под действием поля; 2) хаотическое движение, подобное тепловому движению молекул. Последнее движение Лангмюр определяет по температуре электронов, находящейся в такой же связи со скоростью электронов, как и температура газа с тепловыми скоростями перемещающихся молекул. Основанием к такому подходу послужило то, что, как показали опытные исследования, скорости движения электронов в плазме также подчиняются кривой распределения Максвелла.

По измерениям Лангмюра и других исследователей [Л. VI, 16] оказалось, что температура электронов значительно превосходит температуру молекул газа, среди которых они движутся, и что эта температура изменяется в пределах от 5000 до 80000 и более °К. Изменение температуры в указанном столь широком диапазоне зависит от рода газа или пара, заполняющего разрядный промежуток, от давления этого газа, а также в известных пределах и от диаметра трубки, которая ограничивает плазму.

Изменение температуры электронов в зависимости от давления в ртутной дуге при трубке диаметром в 5 см показано кривой на фиг. 36 [Л. VIII, 13].

Данная кривая показывает, что с ростом давления температура электронов убывает.

Для ионов закон распределения скоростей по Максвеллу не установлен, но для облегчения расчетов, связанных с движением зарядов в плазме, обычно хаотическое движение ионов также оценивают температурой. Лангмюр, в частности, считает, что температуру ионов можно принять равной от $1/4$ до $1/2$ от температуры электронов [Л. VI, 4].

Соответственно двум указанным выше видам движения зарядов в плазме Лангмюр определяет и два вида тока в плазме: 1) плотность тока направленного движения для электронов $j_{n, \text{в}}$ для ионов $j_{n, \text{и}}$; 2) плотность тока беспорядочного или хаотического движения: для электронов j_e и для ионов j_i .

Первый вид тока представляет собой направленный ток, определяемый числом зарядов, проходящих в 1 сек. через сечение в 1 см^2 , пер-

пендикулярное линиям поля между электродами, второй ток определяется числом зарядов, проходящих в плазме через любым образом выделенную площадку в 1 см^2 с одной стороны ее за 1 сек. Так как при хаотическом движении все направления равноправны, то при повороте площадки любым образом вокруг ее точки симметрии плотность тока беспорядочного движения, взятая вдоль нормали к площадке, остается одной и той же. При суммировании плотностей тока, пронизывающих площадку с обеих сторон ее, результирующая плотность тока будет поэтому равна нулю.

Плотность беспорядочного тока, определенная по кривой Максвелла, равна [Л. VI, 4]

$$j = \frac{\bar{n}\bar{v}}{4} e, \quad (\text{VI}, 2)$$

где $\bar{n}$ — число зарядов в см^3 ,

$\bar{v}$ — средняя скорость перемещения этих зарядов; $\bar{v}$ в свою очередь определяется по температуре зарядов T по формуле [Л. V, 4]:

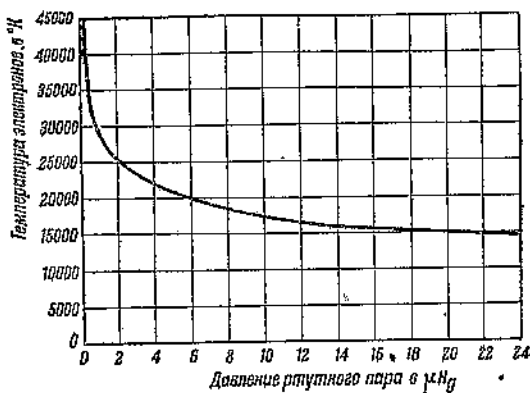
$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}; \quad (\text{VI}, 3)$$

здесь k — постоянная Больцмана;

m — масса заряда.

Для беспорядочного электронного тока формулы (VI,2) и (VI,3) дают

$$j_e = \frac{n_e e}{4} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} = 2,48 \cdot 10^{-14} n_e \sqrt{T_e} \text{ А/см}^2. \quad (\text{VI}, 4)$$

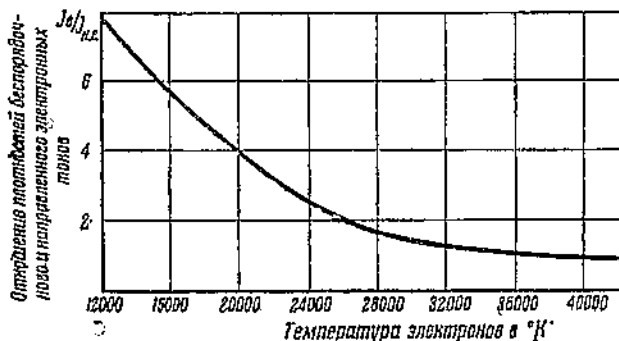


Фиг. 36. Кривая температур электронов в зависимости от давления ртутного пара.

Эта формула показывает, что при заданном давлении, размере трубки и температуре электронов плотность беспорядочного тока пропорциональна числу зарядов в 1 см^3 плазмы.

Исследуя плазму, Лангмюр далее установил, что существуют определенные количественные соотношения между: 1) плотностью электронного тока беспорядочного движения j_e и плотностью электронного тока направленного движения $j_{н.э}$; 2) плотностью электронного и ионного токов беспорядочного движения j_e и j_i .

Первое соотношение, зависящее от температуры электронов, иллюстрируется для ртутных паров кривой на фиг. 37 [Л. VIII, 13]. Как видно



Фиг. 37. Соотношение между плотностями направленного и беспорядочного электронных токов.

из этой кривой, отношение $j_e/j_{н.э}$ изменяется в пределах от 1 до 8, причем при температуре электронов выше $28\,000^\circ \text{K}$ это отношение остается почти постоянным с изменением температуры электронов.

Второе соотношение определяется по формуле [Л. VI, 4]

$$\frac{j_e}{j_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{T_e}{T_i} \frac{m_i}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{VI},5)$$

Для ртутных паров, для которых $\frac{m_i}{m_e} = 360\,000$, и принимая $T_i \approx 0,5 T_e$, мы получаем

$$\frac{j_e}{j_i} = 429. \quad (\text{VI},6)$$

Экспериментально найденное Лангмюром соотношение

$$\frac{j_e}{j_i} = 411 \pm 17\% \quad (\text{VI},6').$$

Найденное соотношение говорит о том, что на каждый проходящий в единицу времени через 1 см^2 плазмы ион приходится около 400 электронов. В такой же примерно пропорции находятся между собой токи ионные и электронные направленного движения. Это значит, что в конечном итоге доля ионного тока в разряде весьма мала ($0,25\%$) по сравнению с долей электронного тока ($99,75\%$). Главное

назначение ионов в разряде сводится, таким образом, как уже упоминалось, не к участию в образовании тока, а к компенсации объемного отрицательного заряда, создаваемого электронами.

б) Влияние стенок. Благодаря беспорядочному движению электроны и ионы выходят из плазмы на ее границах не только у электродов, но и у стенок сосуда, ограничивающих плазму.

Так как концентрация электронов и ионов в плазме одинакова

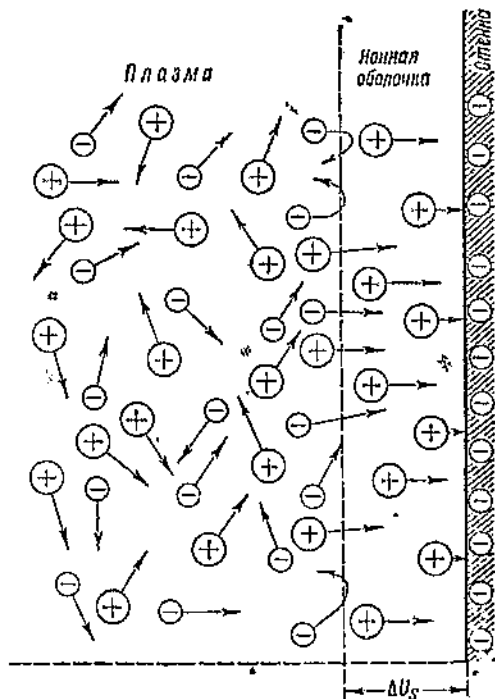
$$n_e = n_i \quad (VI,7)$$

а скорости электронов значительно превосходят скорость ионов, то на стенку вначале при установлении стационарного режима попадает больше электронов, чем ионов. Стенка в силу этого заряжается отрицательно. Но в дальнейшем отрицательно заряженная стенка начинает все сильнее отталкивать направляющиеся к ней электроны и принимать все больше выходящих из плазмы положительных ионов. Процесс уравнивается тогда, когда количество оседающих на стенку ионов делается равным количеству диффундирующих к ней электронов. При установившемся режиме стенка продолжает сохранять избыточный отрицательный заряд, а возле стенки в слое толщиной в десятые доли миллиметра создается оболочка из одних положительных ионов (фиг. 38).

При установившемся режиме под действием разности потенциалов между стенкой и оболочкой ионы из оболочки непрерывно движутся к стенке, где они нейтрализуются, соединяясь с электронами, а на их место из плазмы приходят новые ионы и электроны. На границе у стенки создается, таким образом, динамическое равновесие.

Этот процесс связан с потерей в плазме дуги определенного количества энергии, так как взамен ушедших зарядов в плазме должны быть созданы новые. Затрата энергии в плазме, если пренебречь численно неизвестными пока потерями энергии на излучение возбужденными атомами, а также энергией, отдаваемой метастабильными атомами при их ударе о стенку, должна быть численно равна энергии, уносимой зарядами к стенкам. Последняя суммируется:

1) из кинетической энергии, которую уносят с собой электроны, уходящие из плазмы к стенкам;



Фиг. 38. Схема явления у стенки в плазме дуги.

2) кинетической энергии, которую отдают стенкам ионы; эта энергия суммируется в свою очередь из энергии, которую имели ионы в тепловом движении в плазме, и из энергии, которую они накапливают, пройдя ускоряющее поле в ионной оболочке;

3) из энергии, которая выделяется при рекомбинации электронов и ионов на стенках; сумма всех этих энергий может быть подсчитана, если нам известны: плотность тока (зарядов одного знака), идущего к стенке, температура электронов и ионов в плазме и, наконец, разность потенциалов между стенкой и плазмой, т. е. падение напряжения в оболочке.

Последнюю величину мы можем определить из условия, что электронный и ионный токи к стенке между собой равны. Плотность ионного тока к стенке, очевидно, будет равна плотности беспорядочного тока в плазме, поскольку вне оболочки ионы не подвержены действию поля, а внутри оболочки поле в оболочке направляет ионы к стенке.

Электронный же ток к стенкам будет меньше беспорядочного электронного тока в плазме, так как поле в оболочке у стенки тормозит электроны и потому электроны, которые выходят из плазмы и имеют энергию, меньшую, чем нужно для преодоления затормаживающего действия поля, возвращаются обратно в плазму.

Убыль концентрации электронов, идущих против поля, может быть подсчитана по формуле Больцмана [Л. VI, 4]

$$n_a = n_e e^{-\frac{eU}{kT_e}}, \quad (VI,8)$$

где n_e — число электронов в данном элементарном объеме;

n_e — плотность электронов в плазме;

U — потенциал в данной точке оболочки по отношению к потенциалу плазмы;

e — основание неперовых логарифмов;

e — заряд электрона;

T_e — температура электронов в плазме;

k — постоянная Больцмана.

По формуле (VI,8) может быть также подсчитан и электронный ток, идущий от плазмы к стенке. Если мы обозначим падение напряжения в оболочке через U_s , то плотность электронного тока, входящего до стенки, равная плотности ионного тока к стенке, будет

$$j_i = j_e e^{-\frac{eU_s}{kT_e}}. \quad (VI,9)$$

Беря отношение $\frac{j_e}{j_i}$ и логарифмируя равенство, мы получаем

$$U_s = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{j_e}{j_i}.$$

Поскольку [см. формулу (VI,8')]

$$\frac{j_e}{j_i} = 411 \pm 17, \text{ а } \frac{e}{k} = 11\,600,$$

то

$$U_s = \frac{6,06}{11\,600} T_e. \quad (VI,10)$$

Если, например, $T_e = 25\,000^\circ\text{K}$, то отрицательный потенциал стенки по отношению к плазме $U_s = 13\text{ В}$. В ртутных приборах этот потенциал в зависимости от температуры электронов колеблется в пределах от 6 до 15 В.

Плотность ионного тока, уходящего к стенкам, и энергия, теряемая у стенок, изменяются прямо пропорционально току нагрузки, поскольку n_e изменяется пропорционально нагрузочному току¹. При малых нагрузках, когда разряд между анодом и катодом концентрируется вблизи оси трубки, где плотность газа или пара меньше, плотности ионов у стенок, а также и токи к стенкам будут меньше. После достижения плазмой границы у стенок устанавливается нормальная плотность ионов, уходящих к стенкам.

Зная мощность, выделяющуюся на единице поверхности стенок P_0 вследствие притекания зарядов из плазмы, мы можем определить градиент потенциала в плазме, считая, что должно существовать равенство между мощностью, получаемой плазмой на 1 см ее длины в трубке $P_1 = EI = E\pi R^2 j_n$, и мощностью, теряемой в том же участке плазмы вследствие ухода зарядов к стенкам:

$$P_2 = 2\pi R P_0.$$

Так как

$$P_1 = P_2, \text{ то } E\pi R^2 \cdot j_n = 2\pi R P_0,$$

откуда

$$E = \frac{2P_0}{Rj_n}. \quad (\text{VI},11)$$

Опыт показывает, что P_0 при нормальном диапазоне изменения температуры электронов примерно пропорционально j_n , и поэтому из формулы (VI,11) следует, что градиент потенциала в трубке обратно пропорционален радиусу трубки. Стремясь получить меньшие градиенты потенциала в плазме, мы должны брать трубки возможно больших диаметров.

Пример. Определить потери энергии, связанные с уходом зарядов к стенкам, а также градиент потенциала в плазме у ртутного газотрона с шаровой поверхностью $S = 1000\text{ см}^2$ при рабочем токе $I = 10\text{ А}$, если температура в нижней части катодной горловины $T_k = 37^\circ\text{C}$, температура паров в разрядном пространстве $T_p = 350^\circ\text{K}$, а площадь среднего сечения плазмы $S_{n,n} = 100\text{ см}^2$.

По кривой фиг. 33 определяем вначале давление пара, соответствующего температуре горловины $T_k = 37^\circ\text{C}$; оно равно 6 мк Hg . Для данного давления мы по кривой фиг. 36 определяем температуру электронов T_e , она примерно равна $20\,000^\circ\text{K}$. По найденной температуре и кривой фиг. 37 мы дальше определяем отношение плотности бес-

¹ n_e пропорционально j_n , а j_n находится в свою очередь в постоянном отношении (при заданной температуре электронов) к плотности направленного тока j_{n0} , который почти равен плотности рабочего тока.

порядочного тока к плотности направленного тока. В нашем случае это отношение оказывается равным четырем.

Плотность направленного тока (если пренебречь ничтожно малой долей ионного тока) будет

$$j_n = \frac{I_a}{S_{n,л}} = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ А/см}^2.$$

Плотность беспорядочного электронного тока

$$j_e = 4j_n = 4 \cdot 0,1 = 0,4 \text{ А/см}^2.$$

Плотность беспорядочного ионного тока, равная плотности ионного тока, идущего к стенке, будет примерно в 400 раз меньше:

$$j_i = \frac{j_e}{400} = \frac{0,4}{400} = 0,001 \text{ А/см}^2.$$

Плотность электронного тока, идущего к стенке, будет равна той же величине.

Падение напряжения в оболочке определяем по формуле (VI,10)

$$U_s = \frac{6,06 T_e}{11 600} = 5,23 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot 10^3 = 10,5 \text{ В.}$$

1. Кинетическая энергия, отдавая электронами каждому кв. сантиметру стенки в единицу времени,

$$P_t = j_t U_t = j_n \frac{2k T_e}{e} = 0,001 \cdot 2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2.$$

2. Кинетическая энергия, отдаваемая стенке уходящими из плазмы ионами, сравнительно мала, и мы можем пренебречь ею.

3. Кинетическая энергия, полученная ионами при прохождении ими поля в оболочке и затем отдаваемая стенкам,

$$P_s = U_s j_i = 10,5 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 10,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2.$$

4. Энергия от рекомбинации

$$P_r = U_s j_i = 10,4 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2.$$

Суммируя отдельные составляющие теряемой энергии, мы получаем, что каждому кв. сантиметру стенки будет отдаваться мощность

$$P_0 = P_t + P_s + P_r = (2 + 10,5 + 10,4) \cdot 10^{-3} = 22,9 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2.$$

Потери на полной поверхности стенок, полагая, что эти потери распределяются равномерно по стенкам, будут равны

$$P = P_0 S = 22,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1 000 = 22,9 \text{ Вт.}$$

Принимая для упрощения расчета поверхность колбы в месте прохождения плазмы за цилиндрическую со средним радиусом

$R = 5$ см, мы получаем градиент потенциала

$$E = \frac{2P_0}{Rj_n} = \frac{2 \cdot 2,29 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 0,1} = 9,16 \cdot 10^{-2} \text{ В/см.}$$

с) Явления у катода. Формула Ричардсона-Дешмана, приведенная нами в § 15, количественно учитывает ток эмиссии с накалированного катода для того только случая, когда электроны выходят из катода благодаря кинетической энергии, которую они приобрели при своем тепловом движении в металле. Как показал ряд исследователей, ток эмиссии с катода может быть значительно повышен, если воздействовать на катод электрическим полем так направленным, чтобы оно содействовало выходу электронов из катода. В этом случае „работа выхода“ электронов будет снижена и, следовательно, при той же температуре катода ток эмиссии фактически будет выше тока „тепловой“ эмиссии.

С такой возможностью приходится считаться при рассмотрении работы накалированного катода в ионных приборах, так как объемные положительные заряды (ионы), скопившиеся у катода, могут создать такое местное поле у катода, помогающее выходу электронов. В этом случае ток эмиссии будет заметно превышать номинальный ток тепловой эмиссии. В какой мере различные типы накалированных катодов (оксидные, торированные, термитные) подвергаются действию такого поля в пределах нормального рабочего тока, еще недостаточно выяснено. Но работы Фаунда с оксидным катодом [Л, VI, 14] показали, что при рассмотрении работы такого катода мы должны различать два возможных режима его работы:

Первый режим. На поверхность катода не действуют силы поля, облегчающие выход электронов.

Второй режим. Поверхность катода находится под непосредственным воздействием поля положительных зарядов — ионов.

Первый режим мы имеем тогда, когда рабочий ток меньше тока тепловой эмиссии; второй режим, когда ток нагрузки начинает превышать ток тепловой эмиссии.

Если тепловая эмиссия больше тока нагрузки, то между катодом и плазмой устанавливается двойная оболочка, состоящая из слоя электронов, расположенного ближе к катоду, и слоя из положительных ионов, расположенного ближе к плазме. Электронная оболочка образуется вследствие избытка электронов, выходящих из катода. Под действием поля этой оболочки часть электронов, выходящих из катода, возвращается обратно. При установившемся режиме имеется вполне определенное соотношение между числом электронов, возвращающихся к катоду, и числом электронов, уходящих в плазму дуги. Последняя часть будет примерно соответствовать нагрузочному току.

Положительная оболочка создается вследствие того, что отрицательный объемный заряд электронной оболочки притягивает к себе из плазмы определенное число ионов сверх тех, которые нормально направляются к катоду из плазмы, и отталкивает из близлежащего участка плазмы электроны.

Поле в этих оболочках распределяется так, что почти все катодное падение напряжения приходится на участок, занятый оболочками. Поле

на границе между положительной оболочкой и плазмой равно нулю. На границе между отрицательной оболочкой и катодом существует слабое поле противоположного направления; оно исчезает, когда нагрузочный ток делается равным току „тепловой“ эмиссии.

Когда нагрузочный ток делается больше тока „тепловой“ эмиссии, электронная оболочка у катода полностью рассасывается, и положительная ионная оболочка придвигается ближе к катоду. В этом случае между положительной оболочкой и катодом образуется поле, облегчающее выход электронов из катода. По мере роста тока нагрузки растет плотность зарядов в положительной оболочке и одновременно усиливается поле у катода.

Величина катодного падения напряжения при наличии двойной оболочки у катода определяется условиями ионизации в плазме дуги. Электронам необходимо, пройдя участок катодного падения напряжения, приобрести энергию, достаточную для поддержания средней температуры электронов в плазме такой, чтобы наиболее быстрые из беспорядочно перемещающихся в плазме электронов имели скорость, достаточную для требующейся ионизации в плазме дуги. Так как не все электроны, вышедшие из катода и попавшие в плазму, должны производить ионизацию, а только небольшая доля их (для ртути примерно $\frac{1}{100}$), то, имея в виду, что ионизацию производят быстреешие электроны, мы получаем, что катодное падение напряжения, определяющее среднюю скорость электронов, меньше ионизационного потенциала.

Отличие от ионизационного потенциала в сторону уменьшения будет тем больше, чем больше плотность газа и чем больше плотность метастабильных атомов. Это объясняется тем, что первый фактор из-за уменьшения свободного пробега λ повышает вероятность ионизации, хотя при этом средняя скорость электронов снижается, второй фактор уменьшает падение напряжения, потому что снижает нужную для ионизации среднюю скорость электронов.

При втором режиме нагрузки, когда у катода устанавливается поле, облегчающее выход электронов из катода, катодное падение становится больше требуемого для ионизации, так как часть энергии поля должна затрачиваться еще на уменьшение работы выхода электронов.

ТАБЛИЦА 13

Критические потенциалы распыления торированного катода

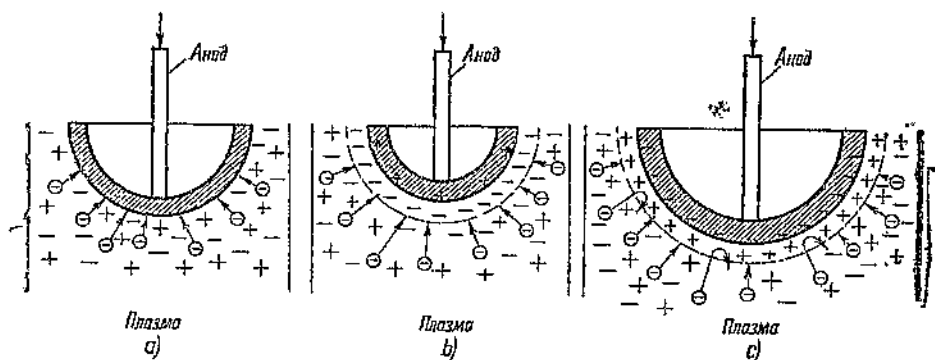
Газ	Гелий	Неон	Аргон	Ртуть
Критический потенциал в В	27	27	25	20

Поле на участке у катода сообщает скорость не только электронам, перемещающимся от катода к плазме, но и ионам, идущим во встречном направлении. Энергия, приобретенная ионами на этом участке, отдается катоду при падении на него (бомбардировка катода). Если эта энергия ионов переходит определенные границы — „критическую равность по-

тенциалов", эмиссионный слой у катодов с поверхностным эмиссионным слоем начинает расплываться.

Величина критической разности потенциалов, как показал в своих работах Хэлл, зависит от рода газа и типа катода. Для торированного катода значения этих потенциалов при разных газах приведены в табл. 13 [Л. VI, 3].

д) Явления у анода. Являясь приемником тока для внешней цепи, анод должен принять из плазмы то число электронов, которое определяет ток внешней цепи I_a . Между тем, „нормальный“ приток электронов из плазмы к аноду, если поверхность анода непосредственно касается плазмы (фиг. 39, а), определяется произведением из плотности



Фиг. 39. Схема физического процесса у анода газотрона. а — оболочки у анода нет — анодное падение равно нулю; б — электронная оболочка у анода — анодное падение положительно; в — ионная оболочка у анода — анодное падение отрицательно.

беспорядочного электронного тока (беспорядочный ионный ток из-за незначительной величины его мы здесь не учитываем)

$$i_e = j_e S_a = \frac{n_e v_e}{4} e \cdot S_a = \frac{n_e \sqrt{\frac{8kT_e}{n_e m}}}{4} e \cdot S_a \quad (\text{VI}, 12)$$

и поверхности анода S_a .

Если произведение $j_e S_a$ равно току внешней цепи I_a , то никаких новых явлений между анодом и плазмой нет [Л. VI, 15]. Анодное падение напряжения в этом случае равно нулю (вариант 1 на последнем участке кривой фиг. 35, б).

Если размеры анода недостаточны, чтобы при непосредственном соприкосновении с плазмой получить от нее требуемое внешней цепью число электронов, то анод (вследствие перераспределения потенциалов во внешней цепи) получает по отношению к плазме положительный потенциал и в результате между плазмой и анодом образуется отрицательная оболочка из электронов (фиг. 39, б). Поле, образованное между зарядами в этой оболочке и положительными зарядами анода, свободно пропускает и направляет электроны из плазмы к аноду.

При этом поверхность отдачи плазмой электронов возрастает за счет переходной оболочки, толщина которой возрастает до тех пор, пока анод не получает требующегося ему числа электронов.

В этом случае имеет место положительное падение напряжения у анода (вариант 2 на последнем участке кривой фиг. 35, б).

В том случае, когда поверхность анода настолько велика, что приходящий к ней беспорядочный электронный ток оказывается больше, чем это требуется внешней цепью, избыток электронов, выбрасываемый плазмой, сообщает аноду отрицательный заряд (отрицательный потенциал), как это нормально имеет место у стенок, ограничивающих плазму, и в результате между анодом и плазмой появляется положительная ионная оболочка (фиг. 39, с). Поле между этой оболочкой и анодом не дает всем электронам, выходящим из плазмы, подойти к аноду, так как возвращает часть электронов, обладающих меньшей энергией, обратно в плазму. Анодное падение напряжения будет в этом случае отрицательным (вариант 3 на кривой фиг. 35, б).

В практически осуществляемых конструкциях газотронов мы чаще получаем положительное анодное падение напряжения.

При недостаточных размерах анода положительное анодное падение напряжения может возрасти до ионизационного потенциала, выше которого начинается производство недостающих электронов в самой оболочке.

Положительное анодное падение напряжения увеличивает потери энергии, вызываемые приходящими к аноду зарядами.

Полная потеря электрической энергии, превращаемая на аноде в тепло, суммируется из:

1) кинетической энергии электронов, которую они имели в плазме,

$$P_s = I_a U_s = I_a \frac{2kT_s}{e};$$

2) энергии, приобретенной электронами в поле электронной оболочки, если только такая оболочка имеется,

$$P_s = I_a U_s;$$

3) энергии возврата электронов в металл, численно равной работе выхода,

$$P_\varphi = I_a \varphi.$$

Складывая отдельные виды потерь энергии, мы получаем

$$P = P_s + P_s + P_\varphi = I_a \left(\frac{2kT_s}{e} + U_s + \varphi \right). \quad (VI, 13)$$

В тех случаях, когда оболочки между анодом и плазмой нет или эта оболочка положительна, U_s из суммы, стоящей в скобках, выпадает.

25. Падение напряжения в газотроне

Полное падение напряжения в газотроне равно сумме катодного падения напряжения ΔU_k , падения в столбе или плазме $\Delta U_p = El$ и анодного падения напряжения ΔU_a , которое может иметь любой знак:

$$\Delta U = \Delta U_k + El + \Delta U_a.$$

При нормальных условиях работы катодное падение напряжения в ртутных газотронах колеблется в пределах от 5 до 8 В, а в газотронах, заполненных неоном или аргоном, эта величина изменяется в пределах от 10 до 14 В.

Падение напряжения в плазме определяется градиентом потенциала в плазме и расстоянием между электродами. Градиент потенциала обратно пропорционален, как мы видели, радиусу трубки, ограничивающей разряд. Для нормальных типов газотронов градиент потенциала колеблется в пределах от 0,005 до 0,02 В/см, а полное падение напряжения в плазме — в пределах от 0,02 до 0,1 В. Падение у анода изменяется в зависимости от размеров анода в пределах от 2 до 6 В и более.

Суммируя отдельные составляющие, мы получаем, что общее падение напряжения в ртутных газотронах лежит в пределах от 10 до 16 В, а для газотронов с неоном или аргоном — в пределах от 16 до 22 В.

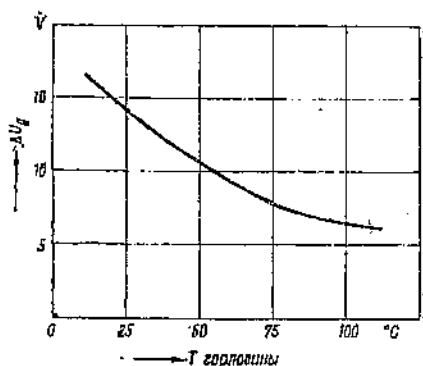
В диапазоне токов, на которые рассчитан данный прибор, общее падение напряжения очень мало зависит от величины тока. В значительно большей степени полное падение напряжения в газотроне зависит от плотности газа или пара, определяемой в ртутных газотронах, главным образом, температурой нижней части катодной горловины. Эту зависимость иллюстрирует опытная кривая, данная на фиг. 40.

Повышение падения напряжения с уменьшением рабочей температуры горловины в ртутных газотронах или с уменьшением плотности газа в газотронах, заполненных инертным газом, объясняется тем, что при меньшей плотности газа понижается вероятность ионизации. В результате делается все более и более затруднительным получение нужного числа ионов для компенсации объемного заряда в плазме. Кроме того, диффузия зарядов к стенкам с уменьшением плотности газа также увеличивается.

Таким образом с точки зрения падения напряжения в приборе более благоприятные условия (большой к. п. д.) мы получаем при больших плотностях газа или пара. Однако при этом уменьшается вентиляционная прочность газотрона (см. § 29).

26. Вольтамперная характеристика газотрона

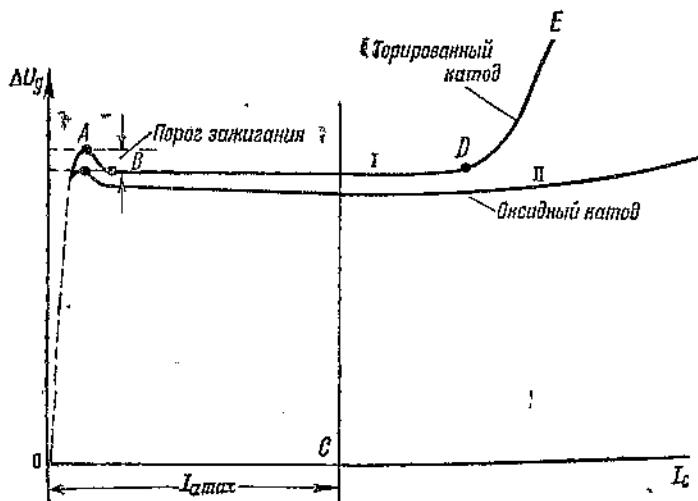
Если опытным путем снять полную кривую зависимости напряжения на электродах газотрона от нагрузочного тока, то мы получим кривую, подобную представленной на фиг. 41. Кривая I представляет собой вольтамперную характеристику ртутного газотрона с торированным



Фиг. 40. Кривая падения напряжения в ртутном газотроне в зависимости от температуры катодной горловины.

катодом, кривая II — вольтамперную характеристику такого же газотрона с оксидным катодом.

На первой характеристике выделены три участка OA , BD и DE , не считая переходного участка AB . Первый участок OA характерен тем, что при чрезвычайно малых токах напряжение на электродах прибора растет весьма быстро. Здесь имеет место чисто электронный разряд, так как электроны не имеют еще тех скоростей, которые необходимы для ионизации газа. Точка A характеризует момент, когда наиболее быстрые из электронов достигают потенциалов ионизации и в межэлектродном пространстве начинается ионизация газа. Начиная с этого момента, в течение весьма короткого промежутка времени,



Фиг. 41. Вольтамперные характеристики газотрона.

называемого временем зажигания, между электродами газотрона зажигается дуга. При этом напряжение между электродами вначале даже несколько снижается — участок AB (порог зажигания) — в связи с перераспределением падения напряжения в разрядном промежутке и появлением метастабильных атомов в плазме дуги, снижающих среднюю величину ионизационного потенциала.

При нормальных условиях разряда величина порога зажигания не превосходит обычно 2—3 В. При наличии посторонних газов или при наличии заметного заряда на стенках газотрона порог зажигания может оказаться значительно больше.

В конце срока службы газотрона порог зажигания благодаря истощению катода и появлению зарядов на стенке иногда возрастает до величины 30—40 В. Такой порог зажигания свидетельствует о „затрудненном зажигании“ дуги.

После порога зажигания напряжение между электродами (напряжение горения) при дальнейшем росте тока возрастает чрезвычайно мало (пологий участок характеристики BD).

Пологий участок кривой за точкой *B* определяет собой рабочий участок на вольтамперной характеристике. Здесь величина напряжения, как указывалось, зависит от плотности рабочего газа или пара, т. е. практически для ртутных газотронов от температуры катодной горловины.

За точкой *D* начинается резкий подъем характеристики *I*, свидетельствующий о значительном росте падения напряжения внутри прибора при относительно малом изменении нагрузочного тока. Этот участок аналогичен участку насыщения в вольтамперных характеристиках электронных приборов. Разница здесь заключается лишь в том, что при переходе на этот участок у газотронов ток может продолжать расти за счет усиления эмиссии из катода при бомбардировке их ионами и отчасти за счет дополнительной понижающей в плазме дуги. Переход на данный участок работы совершенно недопустим, поскольку из-за роста падения напряжения в приборе сверх критических потенциалов наступает быстрое распыление катода.

Нормальный ток нагрузки выбирается поэтому таким образом, чтобы максимальное значение этого тока $I_{a\max}$ (отрезок *OC* на фиг. 41) определялось пологим участком характеристики.

Оксидные катоды, как показывает характеристика *II*, тока насыщения не имеют. Максимальный ток нагрузки лимитируется здесь сроком службы катода.

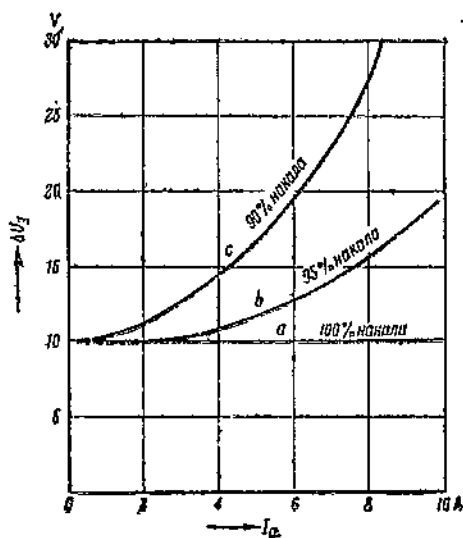
Характеристики *I* и *II* относятся к определенной температуре накала катода. При недокале повышается, во первых, горизонтальный участок характеристики, и, во-вторых, у характеристик типа *I* участок *BD* сокращается, а *DE* получает все более и более крутой подъем.

Сказанное иллюстрируется кривыми фиг. 42. Кривая *a* дает падение напряжения в приборе при нормальной температуре накала, кривая *b* — при 50% недокале, а кривая *c* — при 100% недокале.

Недокал катода, как видно из этих кривых, может привести к тому, что прибор, нормально рассчитанный на работу на горизонтальном участке, при недокале начинает работать на участке *DE*, что ведет к быстрому разрушению катода.

Это требует сохранения при работе газотрона постоянства величины тока накала газотронов (§ 30).

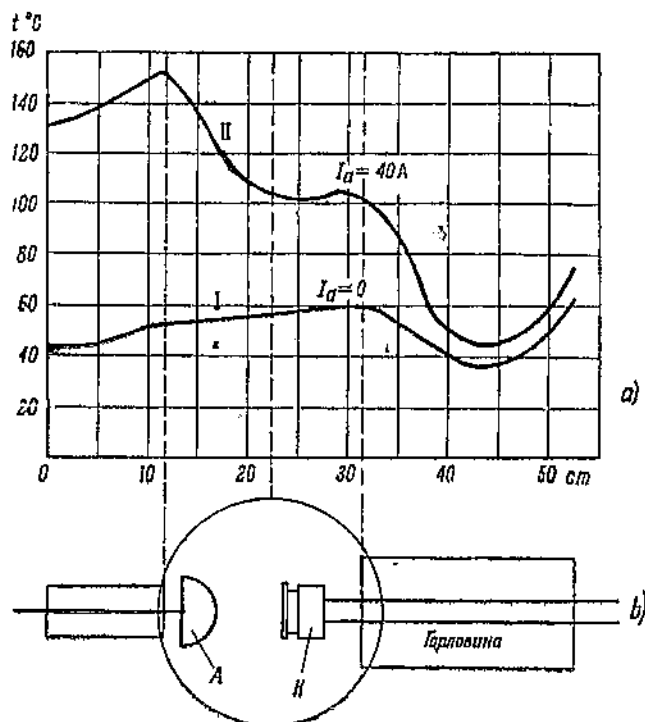
Последнее требование в одинаковой мере относится и к газотронам с оксидным катодом, для которых недокал также связан с сокращением срока службы катода.



Фиг. 42. Кривые падения напряжения при разных токах накала катода.

27. Температурный режим газотрона

Все основные характеристики газотрона зависят, как мы видели, от плотности газа или паров ртути, заполняющих сосуд газотрона. У ртутного газотрона эта плотность целиком определяется распределением температуры по отдельным частям колбы. Температура нижней части катодной горловины, содержащей жидкую ртуть, определяет собой давление паров, а температура в области анода и катода при заданном



Фиг. 43. Кривые распределения температур вдоль стенок колбы газотрона: *I* — распределение температур при холостом ходе и включенной цепи накала; *II* — распределение температур при нагрузке.

давлением паров определяет собой плотность паров в межэлектродном пространстве.

Для суждения о распределении температуры вдоль поверхности колбы на фиг. 43 приведены опытные кривые температур для 40-А газотрона завода „Светлана“, измеренные при холостом ходе (кривая *I*) и при полной нагрузке (кривая *II*) при температуре окружающего воздуха 26°C. Кривая *I* показывает, что при холостом ходе, когда газотрон нагревается только теплом от тока накала, температура вдоль стенок колбы распределяется более или менее равномерно. При включении нагрузки равномерность распределения температур нарушается,

Наиболее высокую температуру получает в этом случае шаровая часть колбы, в особенности верхняя ее часть у перехода к анодной горловине. Здесь температура достигает иногда 200°C . Дальнейший перегрев колбы недопустим из-за возможности выделения стеклом колбы газов и нарушения плотности швов у анодных вводов.

Температура катодной горловины при переходе от холостого хода к режиму полной нагрузки изменяется сравнительно мало. Достижение такого условия является, как мы видели, одной из основных задач при конструировании колбы.

Режим температур устанавливается при холостом ходе спустя 20—30 мин. после включения тока накала, а при нагрузке спустя 40—50 мин. после включения нагрузочного тока.

28. Время зажигания дуги

Когда газотрон применяется в качестве быстродействующего реле, может оказаться нужным знать время зажигания дуги, т. е. время, в течение которого электронный ток i_0 переходит в ток дуговой, начинающийся при определенной величине анодного тока I_a .

Основанием к расчету времени зажигания является тот переходный процесс, который имеет место при переходе от чисто электронного тока i_0 к ионному току I_a .

Процесс этот протекает в следующих стадиях:

Вначале наиболее быстрые электроны начального тока i_0 , достигая скоростей, соответствующих ионизационным потенциалам, начинают ионизировать на своем пути к аноду молекулы газа или пары ртути. Получающиеся при этом первоначальные ионы частично компенсируют отрицательный объемный заряд, что ведет к усилению следующего потока электронов через трубку. Более сильный электронный поток создает и больший ионный поток. Последний, создавая лучшие условия для компенсации объемного заряда, вновь усиливает электронный ток. Процесс усиления тока идет до тех пор, пока мы не получаем ток I_a .

Если теперь принять, что каждый электрон создает на своем пути z ионов, а время, потребное для продвижения первичного электрона от катода к аноду, мы обозначаем через τ , то за время dt , каждый электрон создаст новые электроны $\frac{z}{\tau} dt$, а электронный ток i_0 за время t , протекшее с начала ионизации, возрастет до величины [Л. V, 5]

$$i = i_0 + \int_0^t i \frac{z}{\tau} dt.$$

Дифференцируя это уравнение для разделения переменных и затем вновь интегрируя, мы получаем

$$i = i_0 e^{\frac{t}{\tau} z}, \quad (\text{VI, 14})$$

зная i_0 , z и τ и задаваясь конечными значениями тока $i = I_a$, при котором начинается дуговой разряд, мы по найденной формуле можем определить время для зажигания дуги.

Пример. Определим время зажигания дуги в газотроне с ртутными парами, имеющем плоские электроды площадью $S=1 \text{ см}^2$ с расстоянием между ними $d=1 \text{ см}$ при напряжении на электродах $U_a=100 \text{ В}$ и при давлении ртутных паров $p=1 \cdot 10^{-2} \text{ мм Hg}$.

Свободный пробег в парах ртути по формуле (V, 1) при заданном давлении паров ртути равен

$$\lambda = 1,6 \text{ см.}$$

Это несколько больше расстояния между электродами рассматриваемого газотрона.

Время, потребное для прохождения электроном пути d , определяем по формуле свободного перемещающегося тела (электрона) под действием силы напряженности электрического поля $E = \frac{U_a}{d} = 100 \text{ В/см}$; мы получаем $\tau = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ сек.}$

Число ионизаций на 1 см пути для давления паров $p=0,01 \text{ мм Hg}$ и разности потенциалов $U_a=100 \text{ В}$ мы, интерполируя, находим из табл. 12: $z=0,185$.

Начальное значение тока i_0 , подсчитанное по формуле (V,12') при условии, что $S=1 \text{ см}^2$, оказывается равным $i_0=2,3 \cdot 10^{-3} \text{ А}$. Конечное значение тока i , при котором устанавливается дуга, мы принимаем $I_a=1 \text{ А}$.

Подставляя найденные числовые значения в формулу (VI,14) и подсчитывая время T , получаем $T=1,4 \cdot 10^{-7} \text{ сек.}$

29. Нарушение вентильного действия

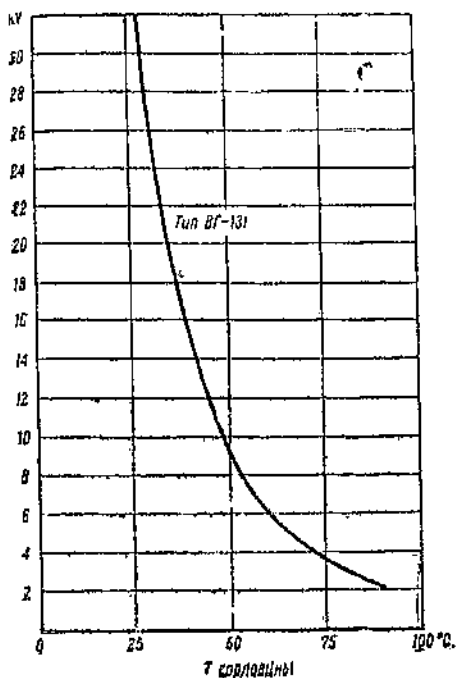
По окончании положительного полупериода дуга в приборе из-за вентильности его действия гаснет, но электроны и ионы, являющиеся продуктом распада положительного столба дуги, исчезают не сразу, а по истечении некоторого времени (время деионизации). В течение этого времени электроны и ионы диффундируют к стенкам и к электродам и постепенно рекомбинируются. Кроме того, к аноду, который в эту часть периода получает отрицательный потенциал по отношению к катоду, направляются ионы, а к катоду — электроны. Это направленное движение зарядов связано с протеканием тока обратного направления.

Однако если: 1) напряжение в обратный полупериод не очень быстро нарастает, если 2) число остаточных ионов не очень велико и, наконец, если 3) нет условий, облегчающих эмиссию электронов с анода, обратный ток в газотроне обычно невелик. Его значения не выходят за пределы нескольких микро- или в редких случаях миллиампер.

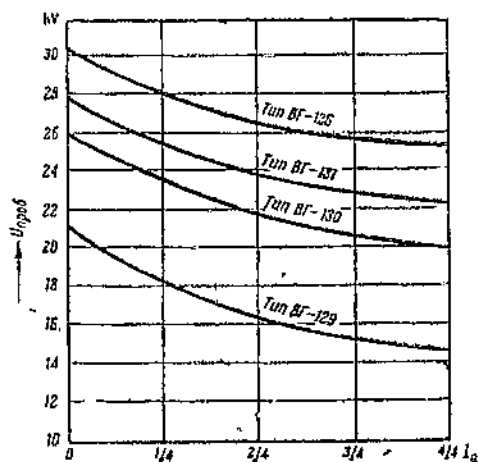
По мере повышения обратного напряжения энергия, связанная с приходом к аноду ионов, растет. В результате при определенном обратном напряжении эта энергия может оказаться настолько большой, что под действием ударов ионов об анод последний начинает эмитировать электроны. Такая эмиссия электронов с анода дает возможность проходить заметному току через газотрон не только в положительную, но и в отрица-

тельную часть периода, т. е. с началом такой эмиссии газотрон теряет свои вентильные свойства. Этот процесс, нарушения вентильного действия прибора носит название обратного зажигания. Предельная величина напряжения, при которой газотрон теряет свое вентильное действие, называется пробивным напряжением газотрона. Пробивное напряжение является одним из весьма важных его параметров и зависит оно от следующих факторов:

1. От плотности газов или паров ртути в газотроне. Для ртутных газотронов, как мы знаем, плотность определяется, главным образом, температурой основания катодной горловины. Чем выше



Фиг. 44. Кривая пробивных напряжений ртутного газотрона в зависимости от температуры катодной горловины.



Фиг. 45. Кривая пробивных напряжений ртутного газотрона в зависимости от нагрузки.

температура, тем ниже, как это видно из опытной кривой фиг. 44, пробивное напряжение [Л. VI, 9]. Это объясняется тем, что при большей плотности газа или пара плотность тока тлеющего разряда у анода больше, что облегчает переход к обратному зажиганию. Кроме того, при более плотной среде диффузия ионов к стенкам меньше и, следовательно, большая их часть направляется под действием поля к аноду.

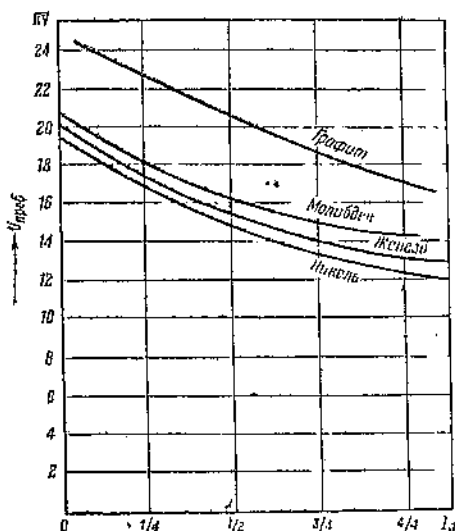
2. От нагрузочного тока. Чем больше ток нагрузки, тем больше плотность остаточных ионов и, следовательно, тем меньше то обратное напряжение, при котором наступает обратное зажигание. Эту зависимость для четырех типов газотронов завода „Светлана“ иллюстрируют кривые фиг. 45 [Л. VI, 9].

3. От общего и местного давлений посторонних газов в баллоне. К посторонним газам в первую очередь относятся также и остатки воздуха в сосуде газотрона, так как они способствуют весьма сильному

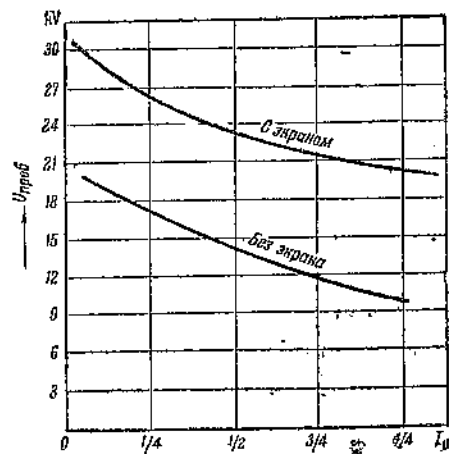
возрастанию плотности тока тлеющего разряда в отрицательную часть периода и более быстрому, следовательно, переходу к обратному зажиганию. Поэтому весьма важно не только хорошо эвакуировать сосуд, но и до максимально возможной степени удалить воздух и другие газы из всех стеклянных и металлических частей, соприкасающихся с вакуумом.

Местное повышение давления может также иметь место при испарении капель жидкой ртути, случайно попавшей на анод. Поэтому при конструировании газотрона, а также и в период его эксплуатации должны быть приняты меры к тому, чтобы возможность оседания капель конденсируемой ртути на аноде была исключена.

4. От материала анода. Материал анода, имеющий наибольшую работу



Фиг. 46. Кривая пробивных напряжений ртутного газотрона в зависимости от нагрузки для различных материалов анода.



Фиг. 47. Кривые пробивных напряжений при защитном экране и без него.

выхода, дает наименьшую вероятность появления обратного зажигания. Это иллюстрируют кривые фиг. 46, являющиеся опытными кривыми для 4-А газотрона, изготовляемого заводом „Светлана“. Эти кривые показывают зависимость пробивных напряжений от нагрузки при разных материалах анода. Как видно из этих кривых, лучшим материалом для анода является графит, но не для всех типов газотронов применение графита себя оправдывает, так как вследствие относительно большей массы анодной головки графитовый анод обезгазить значительно труднее, чем металлический.

Весьма важно защитить также анод от оседаний на него частичек бария, распыляемых при работе катода, так как барий, осевший на металлический анод, весьма сильно понижает работу выхода электронов. Для защиты анода от таких частиц между катодом и анодом устанавливается металлический экран. Влияние такого экрана показывают кривые пробивных напряжений на фиг. 47 [Л. VI, 9].

5. От температуры анода. Слишком высокие температуры анода недопустимы из-за испарения металла. С другой стороны, слишком низкие температуры повышают, с другой стороны, вероятность обратного зажигания, поскольку при низких температурах повышается плотность паров в области анода. Поэтому размеры анода обычно рассчитываются на тепловой режим с температурой, лежащей при полных нагрузках в пределах от 400 до 600°С.

Так как в нормальных схемах обратное зажигание связано с прохождением ненормально больших токов как через газотрон, так и через элементы схемы, то во избежание порчи приборов и в схеме должны быть предусмотрены защитные средства, обеспечивающие возможно более быстрое отключение цепи от питающей системы. В более мелких установках для этой цели применяются плавкие предохранители, а в более крупных по мощности установках применяют быстродействующие автоматы.

30. Типы и параметры газотронов

Основное производство газотронов в нашем Союзе сосредоточено на заводе „Светлана“ в Ленинграде. Этот завод изготавливает, главным образом, ртутные газотроны с оксидным катодом. Параметры этих газотронов приведены в табл. 14 [Л. VI, 10].

ТАБЛИЦА 14

Основные параметры ртутных газотронов завода „Светлана“

Тип	Максимальное значение тока	Среднее значение тока	Максимум напряжения	Напряжение накала	Ток накала	Время прогрева катода перед включением рабочего напряжения	Время прогрева после длительного бездействия	Диаметр шаровой части	Максимальная высота	Средний срок службы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	А	А	В	В	А	минуты	часы	мм	мм	часы
ВГ-161	1,0	0,35	2 000	2,5	4,5 — 5,5	2	1	60	140	800
ВГ-129	1,5	0,6	5 000	2,5	8 — 10	5	1	85	205	800
ВГ-130	4,0	1,3	7 000	2,5	20 — 25	5	1,5	115	330	600
ВГ-131	10,0	3,5	10 000	5,0	27 — 33	5	4	165	445	600
ВГ-126	40,0	15,0	12 000	5,0	35 — 45	10	2	225	540	800
ВГ-167	100,0	35,0	10 000	5,0	50	20	2	225	430	800

Кроме того, завод „Светлана“ изготавливает несколько типов низковольтных газотронов с газовым наполнением и с катодами из вольфрама или торированного молибдена (туингары), а также из термита, закладываемого в проволочную сетку (битроны). Параметры низковольтных типов, выполняемых заводом „Светлана“, приведены в табл. 15.

ТАБЛИЦА 15

Основные параметры газотронов низкого напряжения (тунгаров и биптронов), выполняемых заводом „Светлана“

Тип	Материал катода	Газовое наполнение	Среднее значение тока нагрузки в А	Максимум запираемого напряжения в В	Ток накала в А	Напряжение накала в В	Средний срок службы в часах
Тунгар (6 А)	Торированный молибден	Аргон	6	300	12	2,3	1 000
Тунгар (300 А)	То же	Аргон	30	300	30	2,5	1 000
Биптрон	Термитный катод	Неон	10	300	15	2,5	1 000

Одним из основных параметров является ток нагрузки, определяемый, главным образом, катодом. Катод газотрона лимитирует не только амплитудное значение тока, но и среднее значение его. Для оксидных катодов, практически не имеющих тока насыщения, это ограничение связано с продолжительностью жизни катода. Для торированных катодов, у которых эмиссионный одноатомный слой находится на поверхности катода, это ограничение определяется током насыщения.

Среднее значение рабочего тока определяется тепловым и электрическим режимом работы колбы и анода.

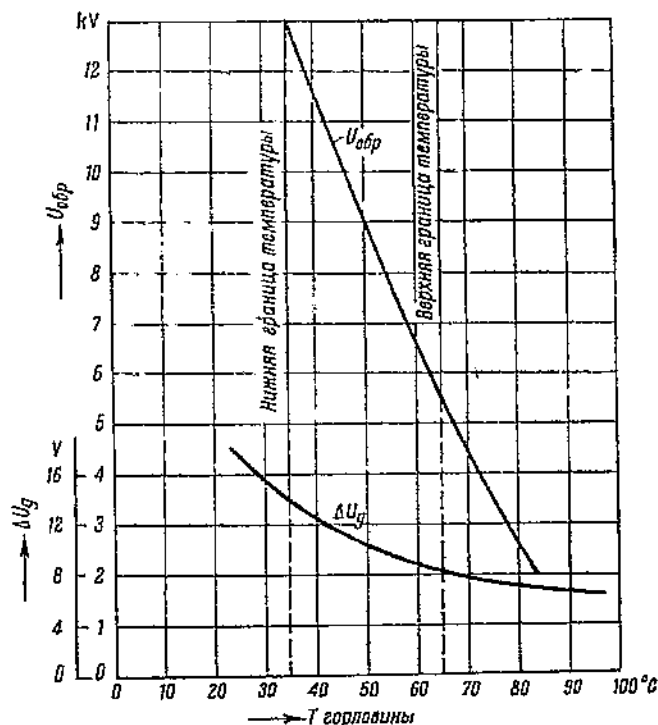
Так как соотношение между максимальным и средним значением тока определяется схемой, в которой работает газотрон (см. табл. 1), и режимом его работы, то маркировка типа производится обычно только по максимальному значению тока, а для среднего значения тока завод-производитель принимает обычно ту или иную кратность между максимальным и средним значением тока. Так, завод „Светлана“, ориентируясь на типовые схемы, приведенные в § 3 и 4, это отношение принял равным трем. Поэтому при подборе газотрона, рассчитанного на работу в той или иной схеме, необходимо после подбора газотрона по максимальному значению тока еще сделать проверку по данным табл. 1, каково среднее значение тока в приборе при работе его в данной схеме.

При работе газотрона в цепи постоянного тока с прерывистой нагрузкой среднее значение тока определяется как арифметическое среднее, взятое за определенный промежуток времени, называемый временем усреднения. При этом завод „Светлана“ и ряд зарубежных фирм требуют, чтобы время усреднения не превосходило 20 сек. Если это время будет превышено, то катод может оказаться поврежденным, хотя бы максимальное значение тока не было превзойдено. Так, например, при нагрузке газотрона ВТ-161 (табл. 14) постоянным током в 1 А, в течение 5 мин., с следующим затем 10-минутным перерывом, срок службы газотрона заметно сократится (из-за повреждения катода),

хотя ни максимальное, ни среднее значение тока, взятое за время в 15 мин. (время усреднения), не превосходили допустимого значения тока в 1 А (максимум) и в 350 мА (среднее значение).

Для газотронов низкого напряжения указаны только средние значения тока, так как перегрузочная способность их в отношении амплитудных значений токов несколько выше, чем у предыдущих типов.

Кроме указанных в таблицах типов завод «Светлана» наметил к выпуску газотроны со средним значением тока в 100 А, что соответствует по номенклатуре завода 300 А амплитудного значения тока.



Фиг. 48. Кривая допустимых обратных напряжений $U_{обр}$ и падение напряжения в дуге газотрона ΔU_g .

Американские фирмы выпускают газотроны до 100 А среднего значения и 600 А амплитудного значения тока.

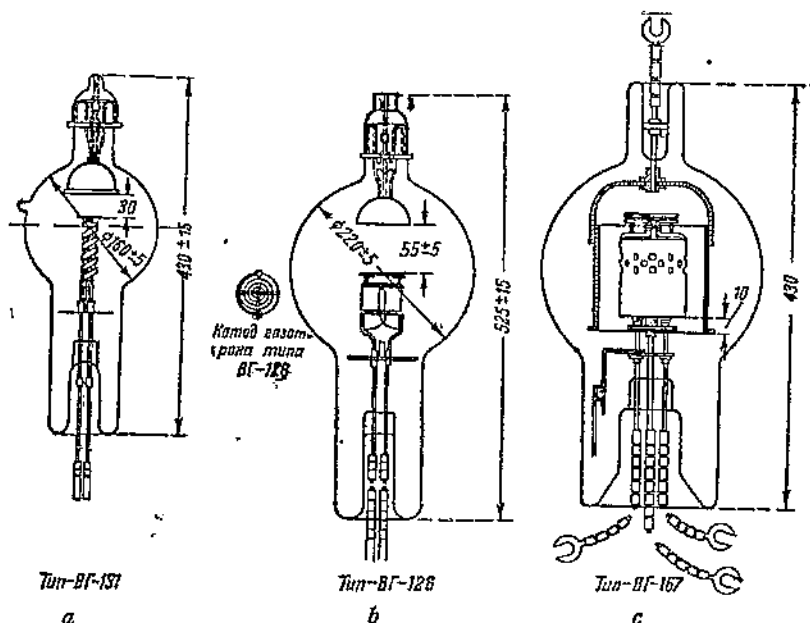
Другим основным параметром газотрона является величина пробивного напряжения газотрона. Это напряжение должно быть выше максимально возможной величины обратного напряжения. Последняя величина, как известно, также определяется схемой питания газотрона. Для ртутных газотронов величина пробивного напряжения зависит от температуры катодной горловины.

На фиг. 48 кроме кривой допустимых обратных напряжений нанесена также кривая падения напряжения в дуге газотрона. По этим двум кривым мы можем определить нормально допустимый диапазон

для температур накаливания горловины газотрона. Нижняя граница температур определяется допустимой величиной падения напряжения в приборе, верхняя граница температур определяется требуемой величиной обратного напряжения.

В газотронах с инертным газом пробивные напряжения обычно заметно меньше из-за того, что при изготовлении приборов их приходится заполнять газом при заведомо более высоком давлении из расчета на последующую абсорбцию газа стенками сосуда.

Следующим весьма важным параметром в газотроне является ток накала газотрона. Накал катода обуславливает, как известно, его эмис-



Фиг. 49. Эскизы газотронов завода „Светлана“.

сионную способность. Требуемый накал обеспечивается, если напряжение накала выдерживается в указанных для данного типа пределах. Колебания напряжения накала не должны выходить за пределы $\pm 10\%$ — 5% от номинального напряжения накала. Меньшая величина допустимого нижнего предела определяется тем, что при недокале из-за уменьшения эмиссионной способности катода резко повышается падение напряжения в газотроне (фиг. 42), а верхняя граница температур определяется условиями испарения катода. Как видно из кривых этого рисунка, при недокале в 10% , падение напряжения очень быстро растет с током и при полной нагрузке может превысить критические потенциалы, что приводит к быстрому износу катода.

Так как вследствие известной теплоемкости катода полную температуру накала катод получает не сразу, а в течение некоторого промежутка времени (время накала), то до истечения этого времени газотрон не должен включаться на рабочее напряжение.

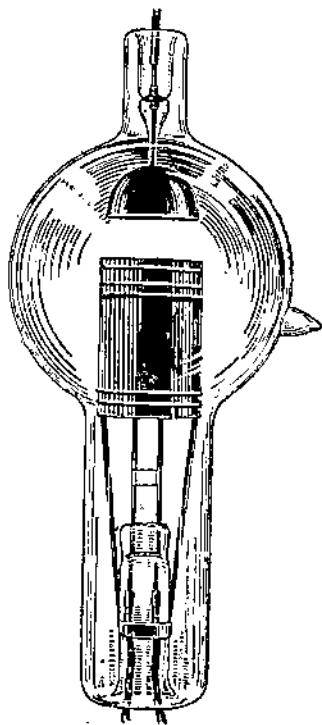
Помимо значений времени накала, требующегося при нормальной эксплуатации газотрона (столбец 7, табл. 14), в табл. 14 (столбец 8) указано также время, потребное для предварительного прогрева газотрона после длительного периода его бездействия или хранения на складе. Это время измеряется в часах и обуславливается необходимым восстановлением вентильной прочности газотрона, которая может быть снижена из-за попадания капель ртути на анод, поглощения остатков посторонних газов катодом и т. д.

Последним весьма важным параметром газотрона является срок его службы. Этот срок определяется, главным образом, сроком службы катода. Гарантийный срок службы для газотронов завода „Светлана“ дан в графе 11 табл. 14. Срок службы газотронов у отдельных зарубежных фирм заметно выше, достигая для отдельных типов 6 000—8 000 час. (газотроны Джeneralь Электрик).

Необходимо отметить, что срок службы в весьма большой степени зависит от режима эксплуатации газотрона. При правильном режиме эксплуатации удастся гарантированный срок службы заметно превысить. Но нередко можно встретить газотроны, которые даже гарантийного срока службы не выдерживают. Особо частым дефектом в этом отношении является осыпание окиси с катода, что имеет место после длительного хранения газотронов на складе. Настоящая причина этого явления до сих пор точно не установлена. Существует предположение, что осыпание оксидного слоя в ртутных газотронах обусловлено тем, что при длительном хранении ртутные пары проникают в толщу оксидной корки и образуют там со свободным барьером амальгаму. При прогреве катода ртуть из амальгамы быстро испаряется и разрушает оксидный слой у поверхности катода.

Эскизы с указанием наружных размеров газотронов типа ВГ-131, ВГ-126 и ВГ-162, строящихся заводом „Светлана“, даны на фиг. 49. Фотография типа ВГ-126 дана на фиг. 50.

Наряду со стеклянными газотронами американские фирмы строят и металлические газотроны. В последних конструкциях медный анод, являющийся одновременно и защитным кожухом для газотрона, охватывает собой катод, монтируемый на стеклянном или металлическом основании. В первом случае газонепроницаемый шов между стеклом и медью производится сваркой их феррохромом. Во втором случае сварка между двумя металлами производится через изолирующий слой специальной эмали.



Фиг. 50. Газотрон типа ВГ-126.

31. Конструкция газотронов

Основными рабочими деталями газотрона, как и кенотрона, являются: 1) катод, 2) анод и 3) баллон газотрона.

а) Катод. Наиболее ответственной деталью газотрона, определяющей, как выше уже говорилось, нагрузочную способность прибора и срок его службы, является катод. Прогресс развития приборов с накаливаемым катодом, главным образом, идет под знаком получения наиболее надежно и продолжительно работающего катода.

Почти все ртутные газотроны, изготавливаемые заводом „Светлана“, имеют оксидные катоды. Керном у этих катодов служит никелевая лента, сворачиваемая или в виде двухходовой спирали у газотронов до 10 А (фиг. 49, а) или же в виде архимедовой спирали у газотронов с током до 40 А (фиг. 49, б).

Оксидом этих катодов служит изоморфная смесь из углекислых солей бария, стронция и кальция ($BaCO_3$, $SrCO_3$, $CaCO_3$), цементируемая коллодием. Безводный раствор этой смеси наносится пульверизатором на горячую поверхность керна. При прокалке катода в процессе его изготовления происходит активизация катода, заключающаяся в выделении на поверхности керна одноатомного эмитирующего слоя [Л. VI, 13].

Оксидные катоды уже при температурах 700 — 800°С способны давать большой ток эмиссии, достигающий в некоторых случаях до 1 А/см². Экономичность таких катодов колеблется в пределах от 0,1 до 0,25 А/Вт. У мощных газотронов с целью получения больших эмитирующих поверхностей катод делают большей частью подогревным. В подогревных катодах ток накала пропускается не через эмитирующую никелевую ленту, а через специальный подогреватель, обычно вольфрамовый, располагаемый внутри катода (фиг. 51). Такой катод кроме большой эмитирующей поверхности имеет еще то преимущество, что он менее чувствителен к неравномерному нагреву его рабочим током, так как поток тепла от подогревателя идет равномерно к эмитирующей поверхности независимо от распределения нагрузочного тока.

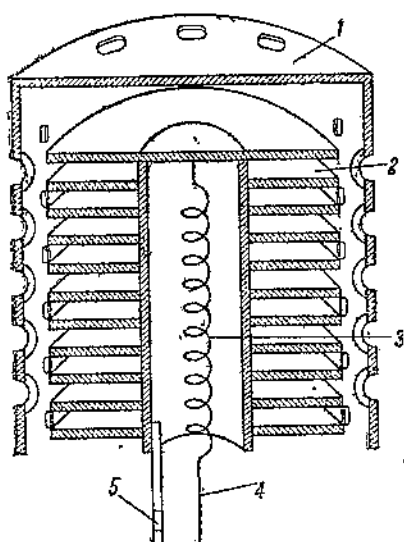
В катодах прямого накала повышение температуры сверх среднего значения, происходящее из-за неравномерного распределения рабочего тока по поверхности катода, вызывает еще большее местное выделение тепла в перегретых местах от тока накала, так как в перегретых местах увеличивается удельное сопротивление материала. В результате двойного перегрева может иметь место перегрузка током эмиссии данного участка катода и в конечном итоге потеря эмиссионной способности этим участком катода. Однако и подогревный катод имеет известные недостатки: во-первых, теплостойкость его больше, в связи с чем увеличивается время, потребное для предварительного прогрева катода, и, во-вторых, такой катод труднее активируется. Поэтому для менее мощных газотронов применяются преимущественно катоды прямого накала.

Газотроны низкого напряжения типа Тунгар (фиг. 52), наполняемые аргоном, строятся с катодом из торированного молибдена. Для отдельных типов газотронов с газовым наполнением (биэтроны) завод

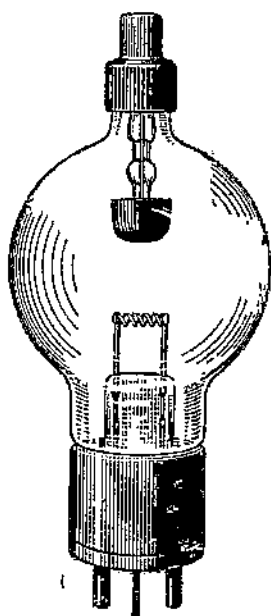
«Светлана» применяет также термитные катоды. Термит представляет собой смесь из окиси бария и порошкообразного алюминия. Таблетки из данной металлической смеси прокладываются между несколькими слоями молибденовой проволоки. Последняя служит в качестве зерна для катода. При тренировке катода (прокаливании его) на поверхности зерна, как и в окисидных катодах, выделяется активный эмитирующий слой.

Экономичность такого катода колеблется в пределах от 0,3—0,5 А/Вт.

Высокая экономичность катодов газотронов достигается также окружением их тепловыми экранами (фиг. 51), которые сильно повы-



Фиг. 51. Катод газотрона косвенного нагрева. 1 — тепловой экран; 2 — эмитирующая поверхность катода; 3 — подогреватель; 4 — зажим для подвода тока накала; 5 — общий зажим для подвода тока накала и анодного тока.



Фиг. 52. Газотрон типа Тунгар.

шают эффективность использования тепла от тока накала. Катоды электронных выпрямителей нельзя окружать тепловыми экранами потому, что они служили бы преградой на пути электронов к аноду. В газотронах (при достаточно рациональной конструкции их) плазма проникает в любые разветвления поверхности катода, поэтому здесь устройство тепловых экранов совершенно не мешает перемещению электронов от катода к аноду.

Экранировка катода имеет и свою отрицательную сторону, заключающуюся в увеличении времени, требующегося для предварительного прогрева экранированного катода в связи с ростом его теплоемкости. Поэтому в маломощных газотронах тепловую экранировку катодов делают сравнительно легкой.

Кроме тепловых вертикальных экранов катоды газотронов снабжаются еще одним, а иногда и двумя горизонтальными экранами, располагаемыми один над катодом, а другой под катодом.

Верхний экран служит для защиты анода от летящих на него частиц бария. Нижний горизонтальный экран служит для защиты капли ртути, лежащей у основания катодной горловины, от непосредственного действия тепловых лучей, идущих с катода.

Весьма важным параметром при конструировании катода является напряжение цепи накала катода. Эта величина не должна превышать минимального возможного потенциала ионизации газа или паров ртути, так как в противном случае между катодными вводами накала может возникнуть дуга. Кроме того, напряжение накала обуславливает различие потенциала концов катода по отношению к аноду. При заметной разнице этих потенциалов может оказаться, что, хотя среднее напряжение между анодом и катодом лежит в допустимых пределах, отрицательный конец катода имеет напряжение (относительно анода), превосходящее критическую величину, вследствие чего произойдет его распыление. Практически напряжение накала для малых газотронов берется равным 2,5 В, а для больших — 5 В.

Из-за малых напряжений приходится иметь большие токи накала, способные производить заметное магнитное воздействие на вылетающие электроны. Токоведущие части катода должны быть поэтому так сконструированы, чтобы предупредить возможность завихрения электронов у катода, при котором электроны, вышедшие из одного пункта катода, возвращались бы к другому его пункту.

б) Анод газотрона. Аноды газотронов изготавливаются из никеля, железа или графита. Никель хорошо обезгаживается и ему может быть придана любая форма. Однако никель имеет малый коэффициент теплоотдачи и не выдерживает больших удельных нагрузок. Кроме того, при падении на никелевый анод частичек бария с катода у него особенно заметно понижается работа выхода, что может привести к частым обратным зажиганиям. В силу этого никелевый анод должен быть особенно тщательно экранирован от частиц бария, летящих с катода.

Аноды в открытых конструкциях газотронов выполняются в виде чашек. По электрическим характеристикам лучшим расположением чашки явилось бы расположение ее выпуклой стороной к катоду. Но в последних конструкциях газотронов аноды располагают вогнутой стороной к катоду, так как при этом возможно лучшее обезгаживание анода во время его прокалики, а также предупреждается возможность собирания конденсирующейся ртути на обратной стороне анода.

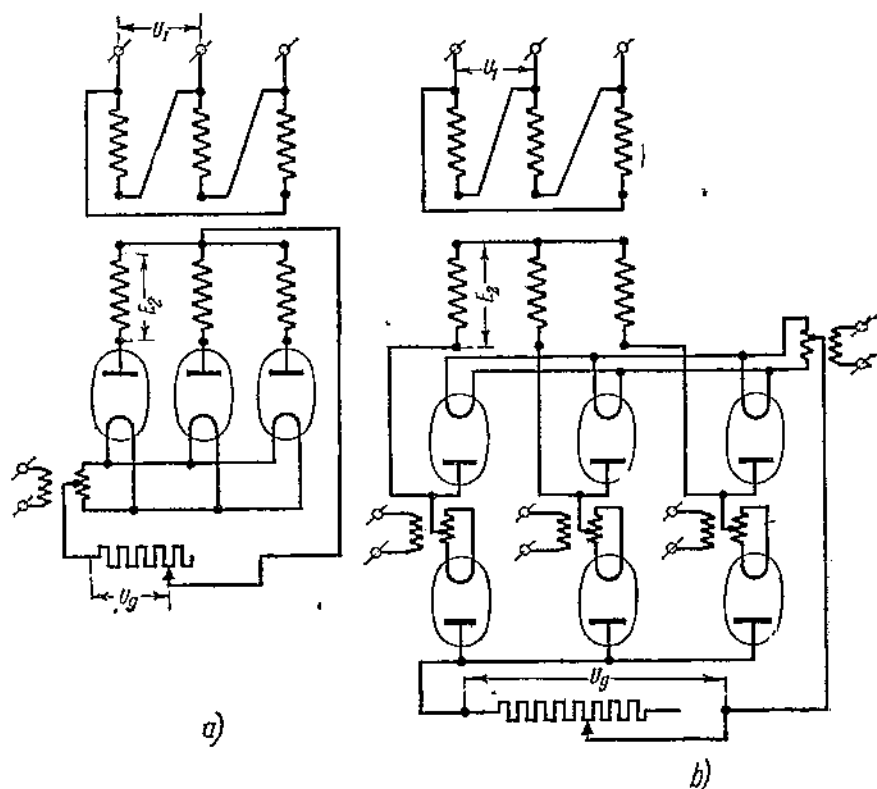
Удаление из анода оклюдированных в нем газов производится путем прогрева его током высокой частоты на откачном посту перед окончательной запайкой колбы.

Вводы как к аноду, так и к катоду осуществляются из молибденовой проволоки, ввариваемой в стекло колбы.

Размеры анода определяются обычно по средней допускаемой плотности тока, которая колеблется в пределах от 0,3 до 0,5 А/см². Кроме того, размеры анода должны быть рассчитаны на требуемый тепловой

режим, который, как выше указывалось, ограничивается температурами в пределах от 400 до 600°С.

с) Колбы газотронов. Колбы большинства стеклянных газотронов выполняются из молибденового стекла. Для малых газотронов колбы делают из свинцового стекла. Форма и размеры колбы подчинены условию получения надлежащего температурного режима отдельных ее частей, рассеивающих ту или иную долю выделяемой на стенках газотрона энергии.



Фиг. 53. Схема трехфазного выпрямления тока приборами с накаливаемым катодом: а — схема с нулевым выводом у трансформатора; б — схема Грэтца.

Выделяемая внутри газотрона мощность включает в себя: 1) мощность, затрачиваемую на накал газотрона $P_n = U_n I_n$, где U_n — напряжение накала, а I_n — ток накала, 2) мощность, отдаваемую стенкам приходящими к ним зарядами, и, наконец, 3) мощность, получаемую стенками от светового излучения из плазмы и теплового излучения от анода.

Большая часть всей этой энергии рассеивается шаровой частью колбы и отчасти анодной горловиной. Катодная горловина, которая в ртутных газотронах делается с заведомо большей длиной, чем это

требуется конструкцией катода, отводит сравнительно небольшие количества тепла.

Температурный перепад в стекле зависит от толщины и сорта стекла. В среднем в выпускаемых в эксплуатацию типах газотронов его можно принять равным $10\text{--}15^\circ\text{C}$.

Весьма большое значение при изготовлении колбы имеет надлежащее обезгаживание стенок колбы, а также смонтированных в колбе стеклянных и металлических частей.

Завод „Светлана“ придерживается следующего порядка 'эвакуировки колбы:

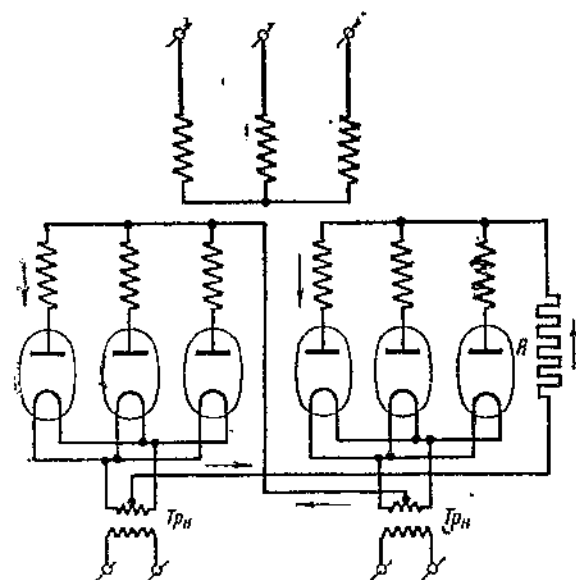
1. Вначале колба в течение известного времени прогревается в газовой печи при температуре $400\text{--}450^\circ\text{C}$.

2. Затем производится предварительное обезгаживание катода путем прогревания его током накала. Вначале дается около 50% от нормального

напряжения накала, а затем через каждые $5\text{--}10$ мин. прибавляют по $0,5\text{ V}$, доводя до нормальной величины напряжение накала.

3. Следующей операцией является обезгаживание анода при прогреве его высокой частотой. При этом температура анода доводится до $1\,000\text{--}1\,100^\circ\text{C}$.

4. Последней операцией по обезгаживанию в ртутных газотронах является вторичное обезгаживание катода. Эта операция производится при повышенном до полторакратной величины напряжении накала катода. Одновременно происходит и активизация катода.



Фиг. 54. Схема каскадного соединения газотронов.

Все указанные операции производятся при непосредственной откачке воздуха и газов из колбы, на откачном посту.

В газотронах, заполненных инертным газом, последней стадией эвакуировки является распыление геттера (магния, бария и др.).

Распыляемые при прогреве высокой частотой частицы геттера захватывают с собой молекулы из оставшегося в баллоне газа и, попадая на стенки, удерживают затем эти молекулы в связанном состоянии. Наиболее распространенным геттером является барий.

В ртутных газотронах применение геттеров невозможно из-за того, что геттеры, амальгамируясь, отдают затем захваченные ими молекулы газа.

До отпайки колба должна быть заполнена ртутью или газом. В последних конструкциях заполнение ртутью производится путем вскрытия предварительно заложенной в газотрон ампулки с химически чистой ртутью (см. отпайки у катодной ножки типа ВГ-167 на фиг. 49). Вскрытие ампулки производится нагреванием ее высокой частотой.

32. Схемы включения газотронов

В качестве нормальных схем при выпрямлении токов газотронами могут быть применены все те схемы, которые были нами рассмотрены в § 3 и 4. Схемы для двухполупериодного выпрямляющего газотрона остаются те же, что и для электронных приборов (фиг. 30). Схемы трехфазного выпрямления тока показаны на фиг. 53, *a* и *b*.

Кроме того, на фиг. 54 показана также схема каскадного последовательного соединения газотронов, известная под названием схемы Вологодина. В этой схеме благодаря двум последовательно соединенным группам газотронов мы получаем двойное значение пробивного напряжения, в связи с чем эта схема может быть применена на двойные значения выпрямленного напряжения.

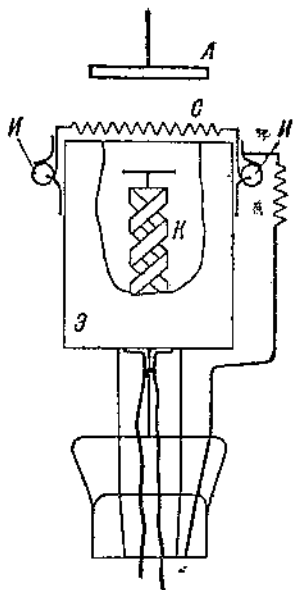
ГЛАВА VII

ТИРАТРОНЫ

33. Устройство и принцип действия

Вакуумный прибор, заполненный ртутными парами или инертным газом, имеющий кроме двух основных электродов (анода и катода) еще третий, вспомогательный, электрод-сетку, носит название тиратрона. Тиратрон получил свое название от греческого слова тира, что значит — дверь¹. Роль двери в данном приборе выполняет сетка, регулирующая ход дугового разряда между рабочими электродами.

Схематическое расположение электродов в тиратроне дает фиг. 55². Из этого рисунка мы видим, что между катодом *K* и анодом *A* тиратрона ближе к катоду расположена электрически изолированная сетка *C*.



Фиг. 55. Схематическое устройство тиратрона. *A* — анод; *K* — катод; *C* — сетка; *И* — изоляторы; *Э* — экран.

¹ В широкое употребление слово „тиратрон“ введено одним из руководителей лаборатории Джeneral' Электрик Компании Хэллом, технически разработавшим данный тип прибора. Практически тиратроном называют только газовые приборы с накаливаемым катодом, снабженные сеткой.

² Изображенная на чертеже конструкция принята заводом „Светлана“. Она предложена Г. И. Бабатом и А. В. Красиловым.

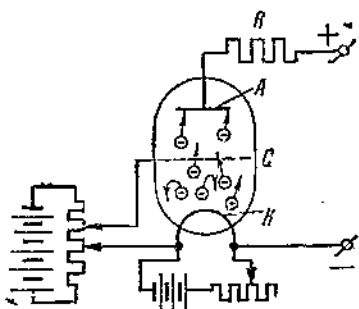
У приборов с накаливаемым катодом сетка делается или из молибденовой проволоки или же из перфорированного листового никеля. Укрепляется сетка при помощи стеклянных или кварцевых изоляторов на цилиндрическом экране, окружающем катод. В конструкции остальных деталей тиратрона в значительной мере повторяет детали двухэлектродного прибора — газотрона.

Давление паров в ртутных тиратронах, определяемое температурой нижней части катодной горловины, то же, что и в соответствующих типах газотронов; давление газа в приборах с инертным газом доходит до 1—2 mm Hg.

Физический процесс, имеющий место в тиратроне, в период проведения тока через прибор, тот же, что и в газотроне. Количественно этот процесс в данную часть периода отличается от соответствующего процесса в газотроне тем, что падение напряжения в дуге несколько повышается за счет сужения плазмы дуги при проходе через сетку.

Наиболее существенным отличием в рабочем процессе тиратрона от газотрона в целом является то, что зажигание дуги в тиратроне происходит не тогда, когда анод делается положительным по отношению к катоду, а в те моменты положительной полуволны анодного напряжения, когда сетка перестает запира́ть разряд (§ 35). Работа сеток является поэтому той основной характерной особенностью, с которой связан рабочий процесс тиратрона.

Для того чтобы полнее выявить те особенности, с которыми связано действие сеток в ионном приборе, предварительно рассмотрим действие сетки в электронном приборе.



Фиг. 56. Схема действия сетки в электронном приборе.

34. Сетка в электронном приборе

При изучении рабочего процесса двухэлектродной вакуумной трубки мы видели, что, меняя напряжение в цепи рабочих электродов, мы могли изменять величину проходящего тока. В этом случае изменение тока происходило за счет изменения поля, устанавливающегося между главными электродами.

Введя в электронную трубку добавочный третий электрод в виде сетки (фиг. 56), мы получаем возможность влиять на величину анодного тока, не меняя поля между главными электродами, а изменяя только поле между сеткой и катодом. Действительно, если сообщить сетке отрицательный потенциал по отношению к катоду, то между сеткой и катодом появится тормозящее электрическое поле, под действием которого часть электронов, направляющихся к аноду, не пройдет через сетку, а вернется обратно к катоду. Это, естественно, поведет к уменьшению анодного тока. При достаточно большом отрицательном потенциале сетки по отношению к катоду электроны вовсе через сетку не пройдут и тока в приборе не будет. Если, наоборот, сообщить сетке

положительный потенциал, то поле сетки будет помогать полю анода ускорять электроны, вышедшие из катода, и ток возрастет (если не достигнут ток насыщения).

Меняя потенциал сетки в определенном диапазоне величин, начиная от некоторых отрицательных значений и кончая известными положительными значениями потенциала, мы можем, таким образом, изменить анодный ток от нуля до максимальной величины, определяемой током насыщения.

Изменение тока сеточным напряжением при нескольких значениях напряжений анод-катод U_a показывают кривые, нанесенные на фиг. 57. Здесь на оси абсцисс отложены сеточные потенциалы, считаемые по отношению к потенциалу катода, а на оси ординат — анодные токи. Сопоставляя характеристику фиг. 57 с вольтамперной характеристикой двухэлектродной лампы (фиг. 27), мы видим, что для одинакового увеличения тока ΔI_a величина изменения сеточного напряжения в трехэлектродной лампе значительно меньше, чем соответствующее изменение анодного напряжения в двухэлектродной лампе.

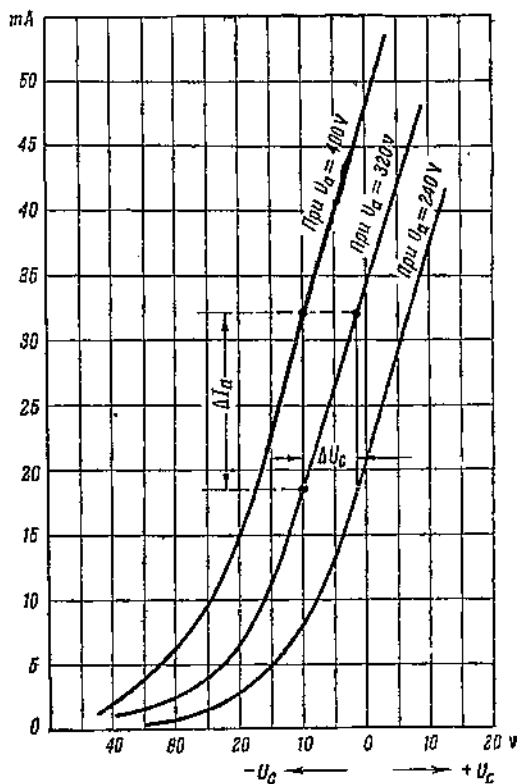
Возможность использования сетки для чувствительного регулирования тока в приборе без изменения величины анодного напряжения открыла целый ряд применений электронному прибору с сеткой.

В частности, одним из наиболее частых применений трехэлектродного прибора является применение его в качестве усилителя и генератора электрических колебаний.

Принципиальная схема работы прибора в качестве усилителя показана на фиг. 58.

Питая сеточную цепь переменным напряжением с небольшой амплитудой, а цепь анод-катод — постоянным напряжением, мы получаем на зажимах a и b вторичной обмотки трансформатора, включенного в цепь анод-катод, переменное напряжение с значительно большей амплитудой.

Такое увеличение амплитуды колебаний следует из различных значений ΔU_a и ΔU_c , соответствующих по характеристикам фиг. 27 и 57 одному и тому же изменению тока ΔI_a [Л. V, 3].

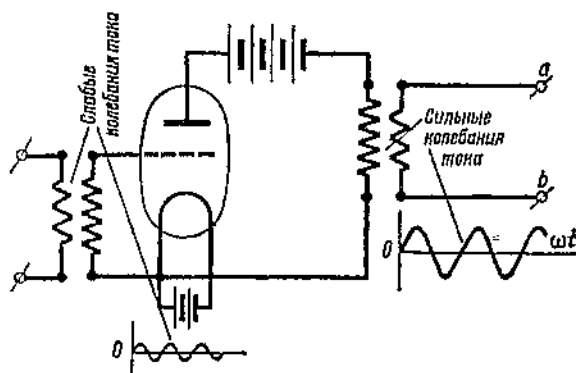


Фиг. 57. Характеристики трехэлектродной лампы.

Отношение изменения анодного напряжения ΔU_a к изменению сеточного напряжения ΔU_c , вызывающих одно и то же изменение анодного тока ΔI_a , называют коэффициентом усиления $\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}$. В практических приборах этот коэффициент колеблется в пределах от 10 до 30 [Л. V, §3]. Коэффициент усиления при наличии нескольких характеристик на

одной фигуре может быть легко определен графически. Так, на фиг. 57 изменению сеточного напряжения $\Delta U_c = 5 \text{ V}$ соответствует изменение анодного напряжения $\Delta U_a = 400 - 320 = 80 \text{ V}$. Коэффициент усиления, следовательно, равен

$$\mu = \frac{80}{8} = 10.$$

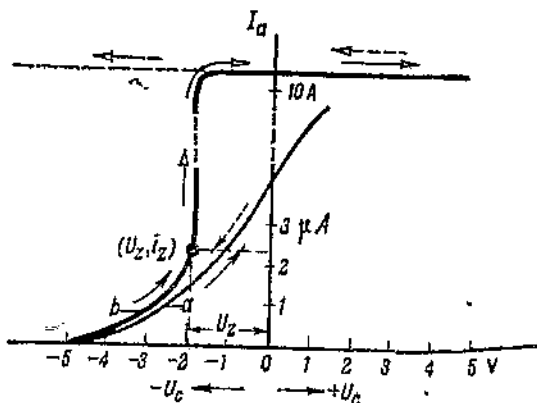


Фиг. 58. Схема электронного усилителя.

35. Сетка в ионном приборе

В отличие от действия сетки в электронном приборе, в котором путем изменения сеточного потенциала можно регулировать анодный ток непрерывно и однозначно, в ионном приборе такой полной регулировки получить нельзя.

Действительно, снимая опытным путем зависимость анодного тока от потенциала сетки по отношению к катоду (кривая *b* на фиг. 59) [Л. VII, 2], мы видим, что вначале, пока значение анодного тока не превышает нескольких микроампер, подъем кривой анодного тока имеет примерно ту же закономерность, как и в электронном приборе (кривая *a*). Затем, начиная с точки U_c , положение резко меняется: анодный ток от значений i_a , измеряемых микроамперами, резко возрастает до значений в несколько десятков и даже сотен ампер, в зависимости от параметров внешней цепи (величины э. д. с., действующей в цепи, и сопротивлений). При этом электронный разряд переходит в ионный — между электродами зажигается дуга. С мо-

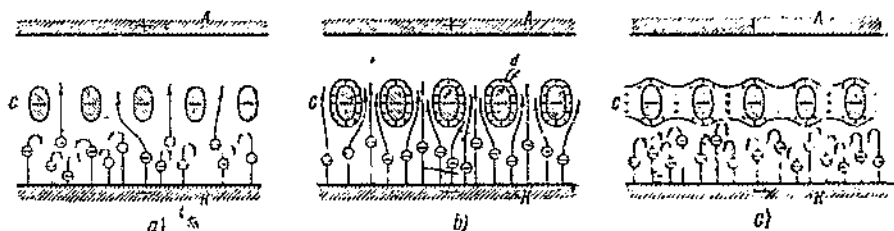


Фиг. 59. Кривая регулирования тока сеткой в ионном приборе.

мента зажигания дуги анодный ток перестает зависеть от сеточного потенциала — характеристика $I_a = f(U_c)$ идет параллельно оси абсцисс. Возвращаясь вновь к тем отрицательным сеточным потенциалам, при которых дуга не горела (обратный ход по характеристике по пунктирной стрелке), мы видим, что дуга не гаснет даже при сравнительно больших отрицательных потенциалах и величина анодного тока остается попрежнему неизменной. Характеристика и в этом случае остается параллельной оси абсцисс. Это значит, что с момента появления дуги между рабочими электродами сеточный потенциал перестает влиять на ход разрядного тока.

Разъяснение этого факта можно получить, если обратиться к физической стороне процесса [Л. VII, 2].

На фиг. 60 показана отрицательно заряженная сетка (стержни сетки даны в поперечном разрезе) в тот период, когда дуговой разряд еще не начался (участок до точки U_z на характеристике фиг. 59). Меняя



Фиг. 60. Схемы действия сетки в нонном приборе: а — электронный разряд — сетка регулирует ток; б — ионный разряд — сетка не влияет на ход разряда; в — остаточные ионы горевшей дуги — сетка вступила в действие

потенциал сетки в этот период, мы можем регулировать величину анодного тока точно так же, как в электронных приборах: уменьшая абсолютную величину отрицательного потенциала сетки, мы получаем увеличение тока за счет усиления электронного потока, проходящего через сетку. Некоторой особенностью является здесь только то, что усиление электронного потока происходит в этом случае не только за счет непосредственного ослабления, сообщаемого сетке извне отрицательного потенциала, но и за счет компенсации отрицательного заряда сетки ионами, постепенно окружающими сетку. Ионы получают в результате ионизации нейтральных молекул, в пространстве сетка-анод, наиболее быстрыми электронами, проходящими сквозь сетку. До точки U_z , характеризующей потенциал зажигания, каждому значению сеточного потенциала отвечает такой установившийся режим ионной оболочки, при котором отрицательное поле сетки скомпенсировано все же не полностью.

При переходе за точку U_z рост электронного тока через сетку и рост ионной оболочки вокруг сетки идут в таком взаимно усиливающемся темпе, что отрицательный заряд сетки оказывается в значительной мере скомпенсированным положительным зарядом ионной оболочки, окружающей сетку (фиг. 60, б), и тогда благодаря свободному ходу

электронов через сетку в газотроне зажигается дуга. С момента появления дуги заряд сетки компенсируется полностью зарядом оболочки, сохраняющей свое существование и в период разряда, и потому ход дугового разряда (как это мы видели из фиг. 59) после зажигания дуги делается совершенно независимым от изменения сеточного потенциала. В компенсирующем действии сеточных отрицательных потенциалов поле сетки и заключается основная разница в действии сеток в электронном и ионном приборах.

Заряды в оболочке, окружающей сетку, не остаются неподвижными, а непрерывно перемещаются к сетке, образуя ток в сеточной цепи. При отрицательно заряженной, по отношению к плазме дуги, сетке ионы из оболочки, окружающей сетку, уходят на сетку и там нейтрализуются с электронами, поступающими из сеточной цепи, а на место ушедших ионов из оболочки плазмы приходят новые ионы. Электронов же в оболочку попадает очень мало, так как электроны отталкиваются электрическим полем, действующим внутри оболочки. При положительно заряженной (по отношению к плазме) сетке к ней направляются электроны и оболочка является электронной.

Толщина оболочки может быть определена по уравнению Лангмюра (V, 12), если вместо m_e подставить массу иона m_i , поскольку условия протекания ионного тока через оболочку аналогичны условиям прохождения электронного тока между двумя электродами с наличием отрицательного объемного заряда. Так как одним из электродов является в данном случае плазма, а другим — сетка, то расстоянием между электродами будет служить толщина оболочки d .

Для плоских электродов по уравнению (V, 12) при подстановке вместо m_e численного значения массы иона m_i , мы для ртутного газотрона получаем

$$d = 0,62 \cdot 10^{-4} \frac{U_a^{3/4}}{j_i^{1/4}} \text{ см.} \quad (\text{VII}, 1)$$

Эта формула показывает, что оболочка будет толще, чем больше напряжение между сеткой и плазмой, и тем тоньше, чем больше плотность беспорядочного тока j_i , определяемая в свою очередь плотностью зарядов в плазме и их скоростью в беспорядочном движении по формуле (VI, 2)

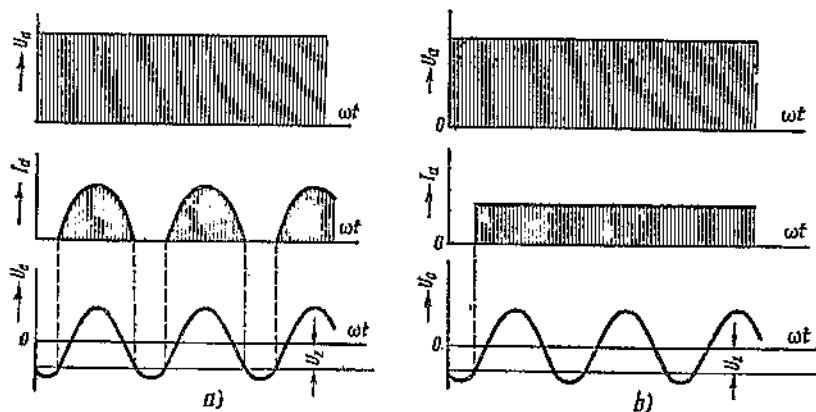
$$j_i = \frac{n_i \bar{v}_i e}{4}.$$

При сетке из круглой проволоки радиус оболочки может быть подсчитан по формуле (V, 13). При большой концентрации ионов плазмы, когда толщина оболочки оказывается весьма малой по сравнению с диаметром проволок, толщина оболочки и при круглых стержнях сетки может быть также определена по формуле (VII, 1).

Рассчитывая d при нормальной концентрации зарядов в плазме ($10^{11} \div 10^{13}$ пар зарядов в см^3), мы получаем для d значения, не выходящие за пределы долей миллиметра, если только значения сеточных потенциалов не выходят за практически приемлемые величины.

Этим и объясняется то, что после зажигания дуги изменением сеточного потенциала нельзя добиться ни усиления разрядного тока, ни его прекращения (если только не иметь в виду слишком густых, практически не приемлемых для нормальных условий работы, сеток или слишком больших, практически также не приемлемых, сеточных потенциалов).

Лишь после того, как дуга между рабочими электродами по окончании положительной части периода гаснет и плотность ионов в разрядном пространстве начинает уменьшаться, оболочка у сетки начинает увеличиваться. С того момента, когда оболочка закрывает собой отверстия сеток (фиг. 60, с), наступают условия, при которых поле



Фиг. 61. Диаграммы тока и напряжения при регулировании сетками в электронном (кривые а) и ионном (кривые б) приборах.

отрицательных зарядов сеток перестает полностью компенсироваться полем положительных зарядов в оболочке, и поэтому поле сетки распространяется и на дальнейшее разрядное пространство, т. е. сетка начинает вновь влиять на движение электронов, выходящих из катода.

Полное отсутствие ионов можно рассматривать как частный случай наличия оболочки, когда эта оболочка имеет бесконечно большую толщину. В этом смысле фиг. 60, а можно рассматривать как частный случай фиг. 60, с.

Разницу в действии сеток в электронном и ионном приборах хорошо иллюстрируют кривые анодного тока, получаемого при питании главной цепи этих приборов постоянным напряжением (верхние диаграммы на фиг. 61, а и б), а сеточной цепи — переменным синусоидальным напряжением (нижние диаграммы на этих фигурах). Откладывая на последних диаграммах кроме синусоид сеточного напряжения так же напряжение сетки U_g , соответствующее моменту зажигания (это напряжение считаем пока постоянным), мы получаем, что в электронном приборе мгновенные значения анодных токов будут пропорциональны превышению синусоидального сеточного напряжения над прямой U_g ; анодный ток (средняя диаграмма) получается в этом приборе пульсирующим. В ионном же приборе при первом превышении синусоидаль-

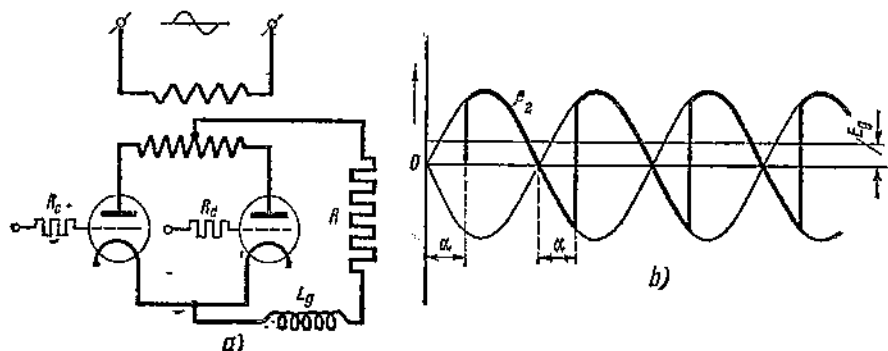
ным напряжением прямой потенциалов U_a зажигается дуга и в анодной цепи устанавливается определенный ток, который затем остается практически неизменным при всех изменениях сеточного потенциала.

Рассмотренное показывает то, что в ионном приборе мы можем, только задав достаточный отрицательный потенциал на сетку, задержать установление дуги между анодом и катодом, хотя бы на анод и было подано достаточно большое положительное напряжение. Непрерывно регулировать мгновенное значение анодного тока путем изменения сеточного напряжения мы в данном приборе не можем.

Функции сетки в ионном приборе являются, таким образом, более узкими, но и при этих условиях сеточный прибор — тиратрон — нашел себе чрезвычайно широкое применение на практике.

36. Регулирование выпрямленного тока и напряжения

В качестве первой иллюстрации пользования сеткой в ионном приборе может быть рассмотрено применение тиратрона для целей регу-



Фиг. 62. *a* — схема при выпрямлении тока тиратронами; *b* — диаграмма напряжения.

лирования среднего значения выпрямленного напряжения и тока. Принципиальная схема такого регулирования показана на фиг. 62, *a*. От обычной схемы выпрямления данная схема отличается наличием управляемой сеточной цепи (подробно показанной на фиг. 75). Сообщая вначале сетке потенциал, более отрицательный, чем U_a , и заменяя его затем потенциалом, менее отрицательным или положительным, мы тем самым можем задержать начало разряда на любой промежуток времени.

Если такая задержка будет производиться для каждого полупериода, то совершенно ясно, что среднее значение напряжения и тока будет уменьшено.

Изменяя угол α (фиг. 62, *b*), которым мы измеряем время задержки разряда от начала положительной полуволны напряжения, мы можем таким образом изменять значения тока и напряжения в пределах от 100% до нуля.

Для питания сеток, управляющих углом α , может быть применена как постоянное, так и переменное напряжение (§ 42).

В первом случае отрицательный (задерживающий) потенциал заменяется для производства зажигания кратковременным положительным импульсом, даваемым на сетку. Регулируя время подачи этого импульса, можно в любых пределах изменять угол α .

При питании сетки переменным напряжением зажигание дуги происходит в момент, когда кривая сеточного напряжения, поднимаясь, пересекает прямую потенциала U_s (фиг. 61). Смещая фазу сеточного напряжения по отношению к фазе напряжения в цепи анода, можно регулировать угол α .

Более подробно схемы сеточного регулирования рассматриваются нами отдельно в § 42.

37. Деионизация в межэлектродном пространстве

Ионы и электроны, содержащиеся в плазме дуги, после того как дуга гаснет, диффундируют к близлежащим поверхностям стенок и электродов и там рекомбинируются. Этот процесс исчезновения ионов из разрядного пространства, носящий название процесса деионизации, совершается не мгновенно, а требует для себя известного времени, называемого временем деионизации.

Учет этого времени приобретает для нас весьма важное значение при работе тиратрона, так как с наступлением очередной положительной полуволны анодного напряжения сетка должна быть готова к тому, чтобы задержать зажигание разряда, а действие сетки, как мы видели, в значительной степени зависит от плотности ионов в пространстве, ее окружающем.

Исчезновение ионов (деионизация) — есть в значительной мере диффузионный процесс (Л. VI, 6), идущий во времени по экспоненциальному закону

$$n = n_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (\text{VII}, 2)$$

где n_0 — первоначальная плотность ионов;

n — плотность ионов в произвольный момент;

τ — постоянная времени, определяющая собой время, в течение которого плотность ионов уменьшается в $e = 2,718$ раз. Теоретически можно считать, что период деионизации длится бесконечно долго, но практически мы можем принять, что процесс деионизации кончается к моменту T , когда сетка вновь становится способной задерживать разряд. Это наступает тогда, когда плотность ионов в пространстве, окружающем сетку, делается настолько небольшой, что ионная оболочка, перекрывая собой отверстия сетки, не мешает распространению отрицательного поля зарядов сетки на область сетка-катод.

Поскольку толщина ионной оболочки зависит не только от плотности ионов в пространстве у сетки, но и от потенциала (фактически заряда) на самой сетке, то и полное время деионизации, определенное по началу восстановления запирающего действия сетки, будет зависеть от ее потенциала.

Скорость диффузионного процесса может быть определена в долях постоянной времени τ .

$$T = m\tau.$$

Здесь m и, следовательно, время T зависят от величины сеточного напряжения и от других параметров сетки; величина же τ для нормальных схем от сеточного напряжения мало зависит.

Постоянную времени деионизации τ можно найти аналитически, если к процессу деионизации применить основное уравнение диффузии молекул газа (по методу Слепяна).

$$k \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (\text{VII, 3})$$

где n — число ионов в рассматриваемый момент;

x — расстояние от рассматриваемой точки до одной из деионизационных поверхностей;

k — коэффициент диффузии, определяемый соотношением

$$k = \frac{1}{3} \bar{v} \lambda \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right), \quad (\text{VIII, 4})$$

где $\bar{v}$ — средняя тепловая скорость ионов в см/сек;

λ — свободный пробег ионов в см;

T_i — температура ионов в $^{\circ}\text{K}$;

T_e — температура электронов в $^{\circ}\text{K}$.

Первым членом ряда, являющегося решением уравнения (VII, 3), будет выражение

$$n = n_0 e^{-\alpha t} \sin bx, \quad (\text{VII, 5})$$

в котором α представляет величину, обратную постоянной времени,

$$\alpha = \frac{1}{\tau};$$

b — постоянная при условии, что у деионизационных поверхностей $n = 0$ эта постоянная будет равна $\frac{\pi}{l}$, где l — расстояние между анодом и сеткой.

Подставляя решение (VII, 5) в уравнение (VII, 3), получаем

$$-n_0 k b^2 e^{-\alpha t} \sin bx = -n_0 \alpha e^{-\alpha t} \sin bx$$

или просто

$$\alpha = k b^2 = k \frac{\pi^2}{l^2}. \quad (\text{VII, 6})$$

Зная выражение для k (VII, 4), мы получаем окончательно расчетное выражение для „постоянной времени“ деионизации

$$\tau = \frac{1}{\alpha} = \frac{3}{\pi^2 \bar{v}} \frac{1}{1 + \frac{T_e}{T_i}} \frac{l^2}{\lambda}. \quad (\text{VII, 7})$$

Уравнение (VII, 7) показывает нам, что постоянная времени деионизации прямо пропорциональна квадрату расстояния сетка-анод и обратно пропорциональна свободному пробегу ионов, или, что то же, прямо пропорциональна давлению газа или паров ртути у анода.

Данный метод расчета требует уточнений, если толщина сетки заметно превосходит диаметр отверстий или если расстояние между сеткой и анодом одного порядка с расстоянием до стенок сосуда у анода.

Пример. Определить постоянную времени деионизации для ртутного тиратрона, у которого расстояние между сеткой и анодом $d = 1,5$ см, температура катодной горловины $t = 45^\circ\text{C}$, а температуры электронов и ионов в первый момент после погасания дуги равны $T_e = 5\,000^\circ\text{K}$, $T_i = 2\,000^\circ\text{K}$.

Давление ртутного пара, отвечающего заданной температуре $t = 50^\circ\text{C}$, мы находим по кривой фиг. 33

$$P = 0,012 \text{ mm Hg.}$$

Свободный пробег λ мы определяем по формуле (V, 1)

$$\lambda = 0,269 \text{ cm.}$$

Среднюю квадратичную скорость определяем по формуле (V, 6) и (V, 8)

$$v_i = \sqrt{\frac{3kT_i}{m_i}},$$

где k — постоянная Больцмана, равная $1,37 \cdot 10^{-16}$ эрг на градус;

T_i — абсолютная температура ионов в $^\circ\text{K}$;

m_i — масса иона.

Вычисляя $\bar{v}$ по v_i по формуле (V, 8'), получаем

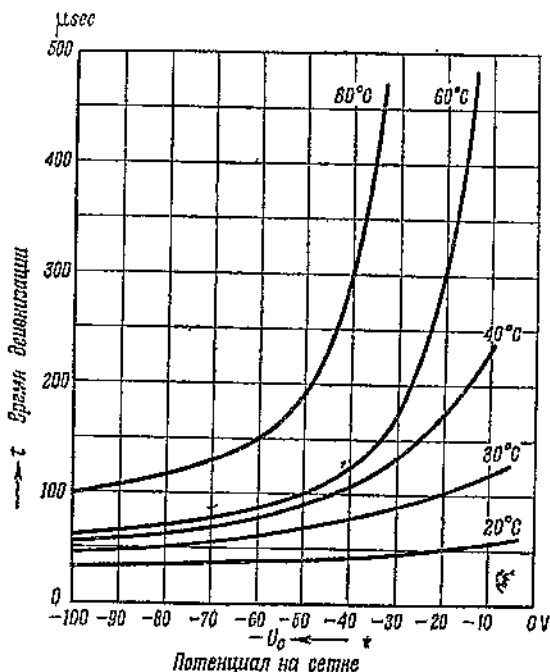
$$\bar{v} = 46\,000 \text{ cm/sec.}$$

Подставляя найденные числовые значения в формулу (VII, 7), получаем постоянную времени деионизации

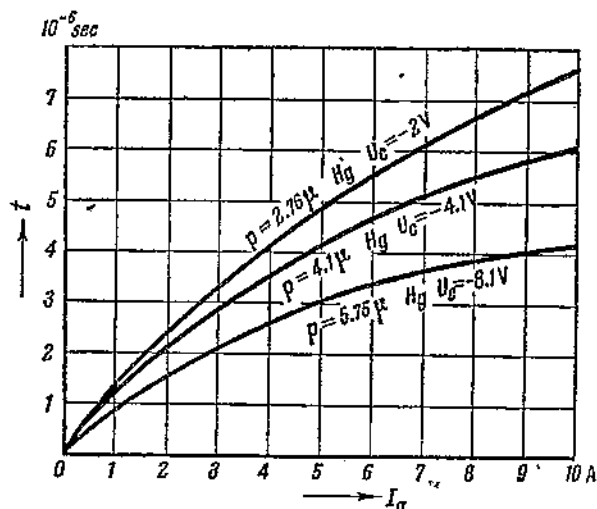
$$\tau = \frac{3}{\pi^2 46\,000} \frac{1}{1 + \frac{5\,000}{2\,000}} \frac{1,5^2}{0,269} = 1,05 \cdot 10^{-5} \text{ сек.}$$

Какое число постоянных времени m необходимо взять для того, чтобы получить полное время деионизации, зависит от значения n_0 в момент потухания дуги и значения отрицательного сеточного потенциала, так как ясно, что, чем больше будет отрицательный сеточный потенциал и чем меньше будет n_0 , тем раньше сетка будет готова к проявлению своего запирающего действия. Зависимость полного времени деионизации в тиратроне от сеточного потенциала, найденную опытным путем, иллюстрируют кривые фиг. 63. Эти кривые сняты при нескольких различных температурах жидкой ртути в тиратроне. Как видно из кривых, полное время деионизации с повышением давления и с уменьшением отрицательного сеточного потенциала резко растет, достигая значений в несколько сот микросекунд.

Зависимость времени деионизации от нагрузочного тока, которым определяется начальное значение плотности ионов n_0 , при заданном давлении и заданном сеточном напряжении дают опытные кривые фиг. 64.



Фиг. 63. Кривые времени деионизации в зависимости от потенциала на сетке.



Фиг. 64. Кривые времени деионизации в зависимости от нагрузочного тока.

Для количественной оценки времени деионизации в тиратронах при тех сеточных напряжениях, которыми обычно пользуются на практике, рассмотрим следующий пример.

Пример. У ртутного тиратрона с ртутными параметрами и с диаметром сеточных отверстий $D = 2$ мм на сетку дан отрицательный потенциал по отношению к плазме дуги $U_c = -10$ В. Определить, через какое время T восстановится запирающее действие сеток, если постоянная времени деионизации τ , определенная по формуле (VII, 7), у данного тиратрона равна

10^{-4} сек., а осциллограмма сеточного тока показала, что начальная плотность тока на сетку после гашения дуги $j_0 = 0,01$ А/см².

Примечание.

Моментом восстановления запирающего действия сетки мы в данном случае считаем момент закрытия оболочки отверстия в сетках. В действительности, этот момент наступит несколько позднее, а именно тогда, когда в отверстиях сетки и вне сетки

появляется избыточное отрицательное поле между анодом и катодом противодействующее положительному полю между анодом и катодом

Определяем вначале плотность ионного тока на сетку, в то время когда сетка начинает запирасть. Эту величину мы можем определить по формуле (VII,1), так как в ней все величины, кроме j_0 , известны. К моменту запираания толщина оболочки d должна быть принята равной половине диаметра сеточных отверстий, т. е.

$$d = \frac{D}{2} = 1 \text{ мм.}$$

Тогда

$$j_i = 0,385 \cdot 10^{-8} \frac{U_a^{3/2}}{d^2} = 0,385 \cdot 10^{-8} \frac{10^{3/2}}{(0,1)^2} = 1,215 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2.$$

Поскольку плотность ионов при деионизации убывает по экспоненциальному закону, то и для тока мы также можем принять этот закон, если пренебречь изменением в температуре ионов, т. е. мы можем написать

$$j = j_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (\text{VII, 8})$$

где τ — известная нам постоянная времени деионизации.

Последнее уравнение дает нам возможность определить искомое время деионизации

$$T = \tau \ln \frac{j_0}{j} = 10^{-4} \ln \left(\frac{10^{-3}}{1,215 \cdot 10^{-5}} \right) = 6,71 \cdot 10^{-4} \text{ сек.}$$

38. Сеточные токи

Для того чтобы оградить внешний участок сеточной цепи в период горения дуги от больших сеточных токов, в эту цепь включается значительное по величине сеточное сопротивление R_s (фиг. 65). Это сопротивление ограничивает также сеточные токи в деионизационный период. Поскольку сетка в этот период заряжена большей частью отрицательно, то обычно на сетку идет ионный ток.

Кроме собственно ионного тока, идущего из разрядного пространства, к сетке притекают также токи утечки, проходящие по стеклу и другим изолирующим элементам между катодом и сеткой. Хотя эти токи утечки весьма невелики и измеряются микроамперами, тем не менее, их приходится учитывать, так как при тех значительных сопротивлениях, которые имеются в сеточной цепи, даже малые сеточные токи могут заметно влиять на потенциал сетки.

Введя в расчет сеточные сопротивления и сеточные токи, мы можем определить те напряжения, которые должны быть поданы на сетку, чтобы к началу положительной полуволны напряжения подготовить запираание сеткой разряда.

Из схемы сеточной цепи, представленной на фиг. 65, видно, что при наличии остатка ионов в разрядном пространстве замкнутый контур сеточной цепи может быть разделен на следующие участки:

1. Участок от катода до края ионной оболочки. Напряжение на этом участке обозначено через $U_{\kappa 0}$. Его величина и знак определяются участком поля между сеткой и катодом, получаемым в результате наложения двух полей; анодного положительного поля в момент записания сеткой и сеточного отрицательного поля.

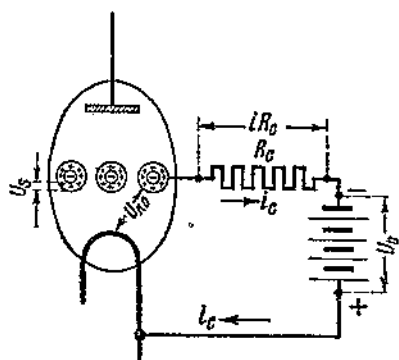
Величину $U_{\kappa 0}$ в момент начала записания мы можем принять равной потенциалу зажигания U_* (§ 35), который в реальных приборах колеблется от -3 до -5 В.

2. Участок оболочки. Напряжение в оболочке U_s зависит от толщины оболочки и может быть определено по уравнению (VII, 1), если другие величины в данном уравнении известны. Для момента, когда сетка начинает запира́ть, мы можем принять толщину оболочки равной радиусу отверстия в сетке (см. примечание к примеру на стр. 102) и тогда, решая уравнение (VII, 1) относительно U_s , мы получаем

$$U_s = \sqrt[3]{6,75 \cdot 10^{18} d^4 j^2}. \quad (\text{VII}, 9)$$

3. Участок сеточного сопротивления. Падение напряжения на этом участке iR_c зависит от сеточного тока и включенного в цепь сеточного сопротивления R_c .

4. Участок источника тока в сеточной цепи; его напряжение U_z является в данном случае искомой величиной.



Фиг. 65. Схема сеточной цепи тиратрона.

Обходя контур по стрелке часов и учитывая знаки для напряжений на отдельных участках цепи, мы получаем

$$U_c = U_{\kappa 0} + U_s + iR_c \approx U_z + U_s + iR_c. \quad (\text{VII}, 10)$$

Пример. Определить минимально необходимую величину напряжения источника в сеточной цепи, при котором сетка начинает запира́ть разряд в ртутном тиратроне. Плотность ионного тока на сетке в момент начала положительной полуволны анодного напряжения $j = 0,01 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$; сетка имеет отверстия с диаметром $D = 2 \text{ mm}$ и деионизационную поверхность $S = 10 \text{ cm}^2$. Сопротивление в сеточной цепи $R_c = 10^3 \Omega$.

Определяем вначале из уравнения (VII, 9) минимально необходимую величину U_s , при которой оболочка заполняет отверстие сетки. Полагая $d = \frac{1}{2}D = 0,1 \text{ cm}$, получаем

$$U_s = \sqrt[3]{6,75 \cdot 10^{18} \cdot 0,1^4 \cdot (0,01 \cdot 10^{-3})^2} = 8,77 \text{ В.}$$

Сеточный ток мы определяем по плотности этого тока у сетки и по площади сетки

$$i = jS = 0,01 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 10^{-4} \text{ А.}$$

Величину U_c принимаем равной 5,0 V, по уравнению (VII, 10) определяем искомую величину напряжения источника в сеточной цепи

$$U_c = 5 + 8,77 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot 10^3 = 13,87 \text{ V.}$$

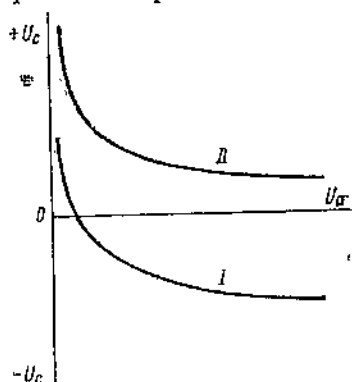
Величина U_c определяет собой запирающее напряжение или запирающий потенциал при наличии остатка ионов от горевшей дуги. Этот потенциал, как видно из рассмотренного примера, оказывается заметно больше введенного ранее потенциала зажигания (запирания) U_z , относящегося к случаю, когда остаточных ионов в разрядном промежутке еще не было. Поскольку U_c зависит от плотности ионов в момент запирания, а последнее в свою очередь зависит от нагрузочного тока и давления газа или пара в газотроне, постольку и U_c зависит от перечисленных факторов.

39. Характеристики сеток

В предыдущем мы исходили из того, что сетки могут начать запирасть тогда, когда толщина оболочки закрывает отверстие сеток. Но это состояние является лишь исходным для начала действия отрицательного поля сетки. Действительное запирание разряда мы получаем только тогда, когда в пространстве сетка-катод действует избыточное отрицательное поле достаточно сильное, чтобы противодействовать положительному полю, устанавливающемуся с началом положительной полуволны напряжения между катодом и анодом.

Очевидно, что запирающий потенциал будет в этом случае зависеть от силы поля между главными электродами, т. е. от анодного напряжения. Опыт, как это видно из кривых фиг. 66, целиком подтверждает существование такой зависимости. Кривые на фиг. 66 показывают зависимость между потенциалом зажигания (он же может быть назван потенциалом запирания) и анодным напряжением. Такие кривые носят название характеристики зажигания, или пусковой характеристики. Первая из двух нанесенных на фиг. 66 характеристик показывает, что зажигание анода (если не учитывать начального участка кривой) начинается при отрицательных сеточных потенциалах. Такая характеристика называется отрицательной характеристикой. Она соответствует сетке с большой проницаемостью, т. е. сетке, у которой диаметр сеточных отверстий довольно значителен.

Вторая характеристика фиг. 66 проходит целиком в положительной области сеточных потенциалов и определяет собой положительную пусковую характеристику. Она соответствует сетке с малой проницаемостью или сетке, имеющей малый диаметр сеточных отверстий. Кривая показывает, что при такой сетке не только не требуется запирать раз-



Фиг. 66. Пусковые характеристики тиратрона.

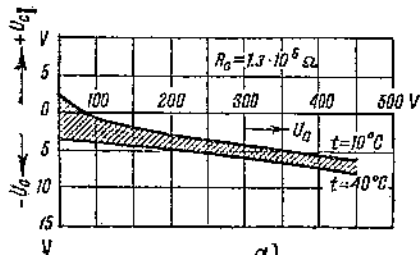
ряд отрицательным сеточным потенциалом, но для начала разряда нужно сообщить сетке положительный потенциал, облегчающий прохождение электронов через сетку, так как положительное электростатическое поле от анода через густую сетку проходит в весьма слабой степени.

Сеткой с положительной характеристикой весьма редко пользуются на практике из-за того, что:

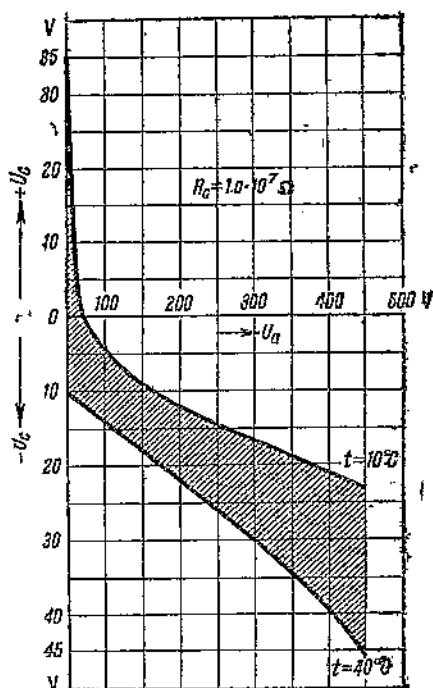
1) при такой сетке довольно заметно увеличивается падение напряжения в дуге в рабочий полупериод;

2) сеточные токи при густой сетке получаются также значительно больше.

Характеристика зажигания, как это следует из § 38, не является строго фиксированной, а зависит от всех тех факторов, которые влияют на величину запирающего потенциала U_c в формуле (VII, 10), а именно от плотности газа или паров, от нагрузочного тока [по-скольку эти величины влияют на слагаемое U_c в формуле (VII, 9)], а также от величины сеточного сопротивления R_c (определяющего падение напряжения iR_c в данной формуле).



a)



b)

Фиг. 67. а — характеристики зажигания тиратрона ТГ-160 при сеточном сопротивлении $R_c = 1,3 \cdot 10^6 \Omega$; б — то же при сеточном сопротивлении $R_c = 1,0 \cdot 10^7 \Omega$.

Влияние на положение пусковой характеристики сеточного сопротивления, а также плотностей паров, или, что то же, температуры катодной горловины в ртутном тиратроне, иллюстрируют кривые на фиг. 67, а и б [Л. VII, 7].

На фиг. 67,а показано, в каких пределах смещается пусковая характеристика тиратрона при изменении температуры горловины в пределах от 10 до 40°C, если сопротивление сеточной цепи $R_c = 1,3 \text{ М}\Omega$, а на фиг. 67,б — то же изменение при $R_c = 10 \text{ М}\Omega$.

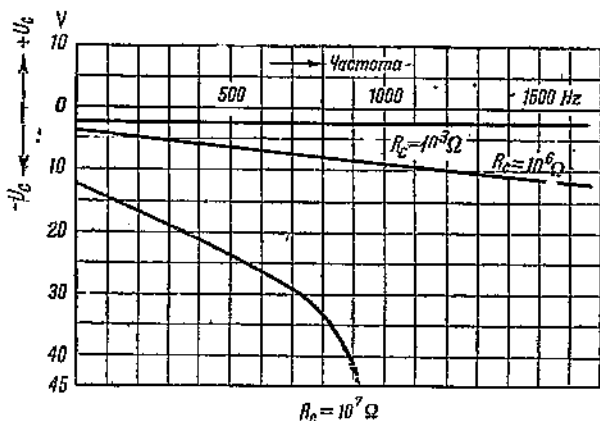
Мы видим, что при колебании температуры мы получаем вместо одной линии, определяющей пусковую характеристику, пусковую об-

ласть, причем с увеличением сеточного сопротивления (фиг. 67, б) эта область не только перемещается вниз в направлении более отрицательных сеточных потенциалов, но и заметно уширяется.

Аналогичные пусковые области мы получаем и при изменении нагрузки в тиратроне от минимальной до полной. Это обусловливается начальной плотностью остаточных ионов после гашения дуги, определяющей при заданном периоде деионизации плотность ионов в момент записания разряда.

Наконец, пусковые характеристики находятся в большой зависимости от частоты переменного тока, поскольку последняя величина определяет фактический период деионизации. Зависимость запирающих потенциалов от частоты иллюстрируют кривые фиг. 68

[Л. VII, 7]. Эти кривые показывают, что с увеличением частоты запирающие потенциалы делаются все более отрицательными и что весьма большое влияние на величину запирающих потенциалов оказывает величина сеточного сопротивления R_c . При большой частоте и значительном сеточном сопротивлении ($R_c = 10 \text{ M}\Omega$) сетка, как видно по резко уходящей вниз пусковой характеристике, вовсе лишается способности управлять разрядом. Предельная частота при данном сопротивлении ($R_c = 10 \text{ M}\Omega$) таким образом 900 Hz.



Фиг. 68. Зависимость напряжения зажигания от частоты при постоянном анодном напряжении.

уходящей вниз пусковой характеристике, вовсе лишается способности управлять разрядом. Предельная частота при данном сопротивлении ($R_c = 10 \text{ M}\Omega$) таким образом 900 Hz.

40. Потеря управляемости сеткой

Ряд причин, обуславливающих потерю управляемости сеткой, как, например, слишком большая частота переменного тока и плохие условия деионизации были нами рассмотрены уже в предыдущем параграфе. Поэтому здесь мы остановимся еще на одной из причин, с которой наиболее часто приходится встречаться на практике, а именно на потере управляемости сеткой вследствие возрастания тока тлеющего разряда.

В период преграждения тока напряжение между сеткой и анодом суммируется по абсолютным значениям сеточного и анодного напряжений, поскольку анод положителен, а сетка отрицательна по отношению к катоду. Под действием этого напряжения между сеткой и анодом может установиться самостоятельный разряд в форме тлеющего разряда. В таком самостоятельном разряде сетка, играя роль катода, эмитирует электроны, которые, уходя к аноду, создают на пути своем ионы. По-

следние, окружая сетку, компенсируют ее отрицательный заряд и в результате лишают ее возможности влиять на поле между сеткой и катодом, а потому и управлять разрядом (потеря управляемости).

Условиями, благоприятствующими возникновению такого разряда, являются: 1) облегченный выход электронов из сетки, получаемый или вследствие перегрева ее теплом катода, или вследствие покрытия сетки налетом оксида из распыляющего катода, 2) повышенное давление газа или пара и, наконец, 3) наличие заметного количества ионов в пространстве сетка-анод, вследствие перегрузки током.

Установим те количественные соотношения, при которых может появиться тлеющий разряд.

Устойчивые формы этого разряда мы получаем, если после ухода каждого электрона из сетки, играющей в данном случае роль катода в тлеющем разряде, вернувшиеся из разрядного пространства ионы, созданные этим электроном, вновь вызовут уход одного электрона при своем ударе о сетку.

Если число ионизаций, производимых одним электроном, на пути мы обозначим через α , то поток из n электронов на элементе пути dx создаст dn новых электронов.

$$dn = n\alpha dx. \quad (\text{VII}, 11)$$

Интегрируя в пределах от 0 до d , где d — расстояние между сеткой и анодом, мы получаем, что число электронов, дошедших до катода, будет

$$n = n_0 e^{\alpha d}, \quad (\text{VII}, 12)$$

где n_0 — число электронов, покинувших катод. Число вновь созданных электронов будет

$$(n_0 e^{\alpha d} - n_0) = n_0 (e^{\alpha d} - 1).$$

ТАБЛИЦА 16

Число электронов, вырываемых 100 ионами, при ударе их о катод при тлеющем разряде

Металл	Г а з		
	Воздух	Неон	Аргон
Никель	3,6	3,1	5,8
Платина	1,7	2,3	3,8
Железо	2	2,2	5,8

Это значит, что каждый электрон, вышедший из катода, вызывает образование $(e^{\alpha d} - 1)$ новых электронов и столько же ионов.

Эти ионы, придя к сетке (катоде), вырвут из нее $(e^{\alpha d} - 1) \gamma$ электронов, где γ — число электронов, которые способен вырвать каждый

нон при ударе своем о сетку (катод). Значения γ приведены в табл. 16, составленной на основе опытных данных, для разных материалов катода и соприкасающихся с ним газов [Л. V, 4].

Для устойчивости разряда требуется, чтобы число электронов, полученных взамен одного ушедшего, равнялось единице

$$(\epsilon^{ad} - 1) \gamma = 1. \quad (\text{VII}, 12)$$

α , входящее в состав формулы (VII, 11), может быть в свою очередь определено из выражения [Л. V, 4]

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{B \cdot p}{E}}, \quad (\text{VII}, 13)$$

где p — давление газа, выражаемое в mm Hg;
 A и B — постоянные, определяемые для данного газа из табл. 17;
 E — напряженность электрического поля, равная $\frac{U}{d}$,
 где U — разность потенциалов между сеткой и анодом в вольтах;
 d — расстояние между ними в см.

ТАБЛИЦА 17
 Значения постоянных A и B в уравнении (VII, 13)

Газ	A	B	Область применимости $\frac{E}{p}$ в V/cm mm Hg
Воздух	14,6	365	150—600
Азот	12,4	342	150—600
Водород	5	130	150—400
Аргон	13,6	235	100—600
Гелий	2,8	34	20—150

Определяя α из уравнения (VII, 12) и подставляя найденное значение в уравнение (VII, 13), мы находим искомую предельную величину разности потенциалов U (пробивное напряжение), при которой наступает устойчивый тлеющий разряд.

Пример. Определить пробивное напряжение между сеткой и анодом в тиратроне, заполненном аргоном, при давлении $p = 1$ mm Hg, если сетка сделана из никеля, а расстояние между электродами $d = 2$ см.

По табл. 16 находим для никелевого катода в аргоне $\gamma = 0,058$. Значения A и B находим по табл. 17: $A = 13,6$, $B = 23,5$ [Л. V, 4]. Из уравнения (VII, 12) определяем

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right) = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{1}{0,058} \right) = 1,45$$

ионизаций на каждом сантиметре пути.

Подставляя найденное значение для α в уравнение (VII, 13) и определяя показатель в правой части этого равенства, мы получаем

$$-\frac{235}{E} = \ln\left(\frac{1,45}{13,6 \cdot 1}\right) = -2,23,$$

откуда напряженность поля

$$E = \frac{235}{2,23} = 105 \text{ В/см.}$$

Разность потенциалов при $d = 2$ см будет равна

$$U = Ed = 105 \cdot 2 = 210 \text{ В.}$$

При 210 В должен начаться пробой. В действительности результаты опыта показали, что для данного тиратрона пробой начинается при 280 В. Полученное расхождение объясняется тем, что в действительности условия пробоя зависят от ряда других, трудно учитываемых факторов, как, например, неравномерность распределения поля, отклонение величины давления газа от расчетного и т. д. При перечисленных ранее факторах, благоприятствующих развитию тлеющего разряда, такой разряд может начинаться и при значительно меньших напряжениях.

41. Типы тиратронов

Завод „Светлана“ изготавливает в настоящее время пять типов тиратронов, заполненных ртутными парами, и столько же типов, заполненных неоном. Параметры всех этих тиратронов приведены в сводной табл. 18 [Л. VII, 7].

Основными параметрами, определяющими тип тиратрона, являются, как и для газотронов, ток нагрузки и запираемое напряжение, а специфическими параметрами для тиратронов, важными в отношении определения качества их, является ширина пусковой области, а также наибольшее значение регулируемого напряжения.

Под максимальным регулируемым напряжением, указанным в графе 5 табл. 18, понимается то напряжение, при котором характеристика зажигания еще сохраняет свою прямолинейность. При еще больших напряжениях характеристика зажигания резко поворачивает вниз, в область больших отрицательных сеточных напряжений, тиратрон перестает управляться.

Величина сеточных сопротивлений, указанных в графе 7, рассчитана на сужение пусковой области и на ограничение мощности в сеточной цепи. Эти данные относятся к случаю, когда тиратрон применяется в схемах с частотой не выше 50 Hz и при анодных напряжениях не выше 3 kV.

В случае более высоких частот или напряжений сеточные сопротивления должны быть взяты в пределах до тысячи омов.

Допускаемые максимальные и средние значения токов для тиратронов те же, что и для аналогичных типов газотронов. Поэтому все, что говорилось в § 30 о соотношениях между максимальным и средним значениями тока, полностью применимо и к тиратронам.

ТАБЛИЦА 18

Основные параметры тиратронов завода „Светлана“

Тип	Максимальное значение тока в А	Среднее значение тока в А	Максимум запираемого напряжения в В	Максимальное значение регулируемого напряжения в В	Ширину пусковой области в В	Рекомендуемая величина сечения точного сопоставления в Ω
1	2	3	4	5	6	7
ТГ-160	1,0	0,35	1 000	750	2	10^8 — 10^6
ТГ-205	1,5	0,6	1 000	750	3	10^8 — $5 \cdot 10^6$
ТГ-203	4,0	1,3	3 000	2 250	5	10^8 — $5 \cdot 10^6$
ТГ-204	10	3,5	3 000	2 250	5	10^8 — 10^4
ТГ-162	40	15	5 000	3 500	5	10^8 — $5 \cdot 10^3$
ТГ-212	0,5	0,125	300	700	4	20— 10^3
ТГ-213	1,5	0,6	500	500	2	$50 \cdot 10^3$
ТГ-214	4,0	1,3	500	500	2	$20 \cdot 10^3$
ТГ-215	10,0	3,5	500	500	2	$5 \cdot 10^3$
ТГ-216	40,0	15	500	500	2	$6 \cdot 10^3$

Примечания: 1. Напряжение накала. 2. Ток накала. 3. Время прогрева катода перед включением. 4. Время прогрева после длительного бездействия. 5. Диаметр шаровой части и высота колбы. 6. Средний срок службы см. аналогичные по максимальному значению тока типы газотронов в табл. 14.

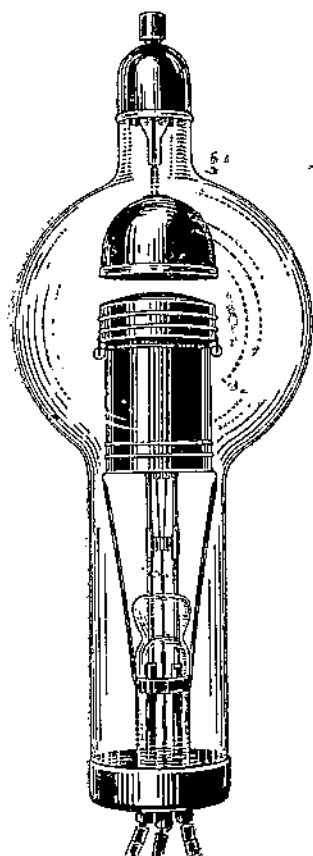
Пробивные напряжения у тиратронов, наполненных неоном, значительно меньше в связи с большим давлением газа у этих тиратронов. Это дает основание отнести этот тип тиратронов к тиратронам низкого напряжения. Сравнивая по табл. 14 и 18 величины запираемых напряжений у тиратронов и газотронов, мы видим, что у последних запираемые напряжения заметно выше. Это обуславливается в значительной мере ограничением напряжения у тиратронов величиной, при которой наступает пробой газа между сеткой и анодом.

Требование ограничения колебания напряжения накала в пределах от -5 до $+10\%$ является для тиратронов еще более обязательным, поскольку перегрев и распыление катода ионной бомбардировкой здесь влияет и на сетку.

Не менее важным требованием для тиратронов является и соблюдение сроков предварительного нагрева катода током накала перед включением анодного напряжения. Лишь в тех случаях, когда на сетку подан отрицательный потенциал, достаточный для надежного запираания тиратрона, анодное напряжение и ток накала могут быть включены одновременно.

Средний срок службы тиратронов завода „Светлана“ равен 1 000 час.

По наружным размерам и исполнению тиратроны завода „Светлана“ не отличаются от равных по мощности газотронов, изготавливаемых тем же заводом. Фотография одного из тиратронов, изготавливаемых заводом, показана на фиг. 69.



Фиг. 69. Тиратрон типа ТГ-126.

42. Схемы сеточного управления

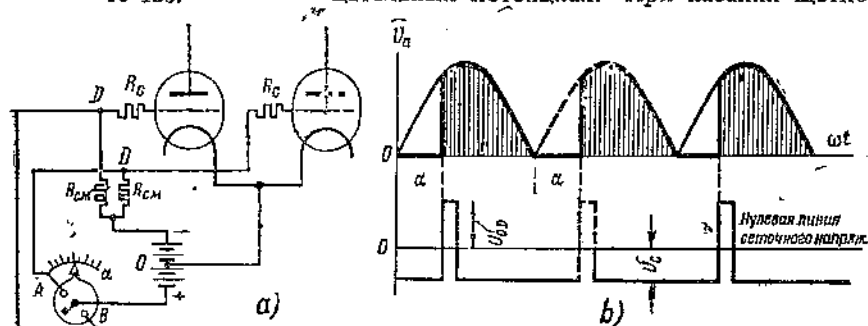
От сеточной цепи тиратронов требуется:

- 1) обеспечение надежного запирания сеткой разряда на анод до наступления момента зажигания дуги, требуемого по условиям работы схемы;
- 2) четкая фиксация момента зажигания дуги на анод.

Эти задачи могут быть решены при различных схемах питания сеточной цепи. Мы рассмотрим схемы, получившие наибольшее практическое применение [Л. VII, 8].

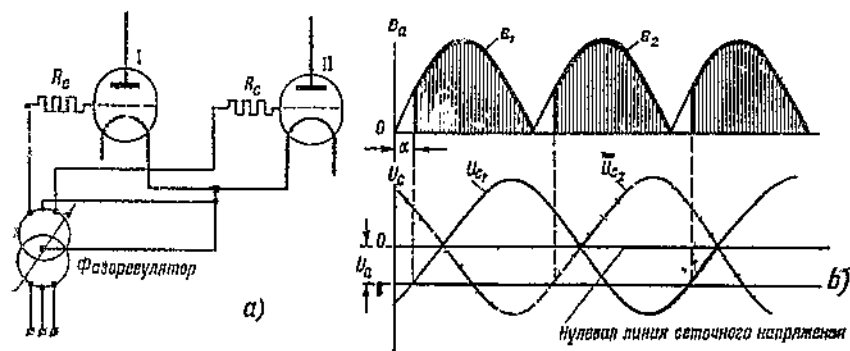
1. Схема с контактным диском (шайбой). Эта схема показана на фиг. 70, а. Здесь питание цепи сеток производится постоянным током. Нормально сетка получает отрицательный потенциал, который лишь при наступлении момента зажигания на небольшой промежуток времени заменяется положительным. Подача положительного потенциала производится через контактный диск, по которому скользит щетка, вращаемая синхронным электродвигателем.

Так как середина батареи присоединена к катоду, то нормально, когда вращающаяся щетка не касается пластин *A* и *B* контактного диска, сетки тиратронов получают отрицательный потенциал. При касании щеткой



Фиг. 70. а — схема сеточного управления с контактной шайбой; б — диаграмма напряжения.

одного из контактов соответствующая сетка получает импульс положительного потенциала. В этот момент на аноде данного тириатрона зажигается дуга. Диаграммы напряжений анодного и сеточного при данном методе регулирования показаны на фиг. 70, *б*. Момент касания щетки



Фиг. 71. *а* — схема сеточного регулирования с фазорегулятором; *б* — диаграмма напряжения.

кой контакта *A* или *B* можно изменять путем поворота контактного диска. Длительность сеточного импульса определяется шириной щетки и контактными пластинами *A* и *B*.

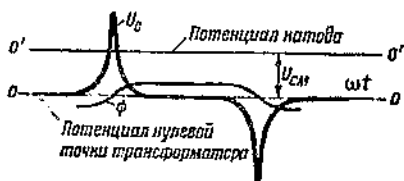
Питание синхронного электродвигателя, вращающего подвижную щетку, производится от той же сети переменного тока, от которой питается тириатрон, что обеспечивает одинаковую частоту сеточного напряжения и напряжения питающей сети.

Этот метод надежен, однако недостатком его является наличие вращающейся машины, требующей постоянного ухода, а также износ вращающихся щеток.

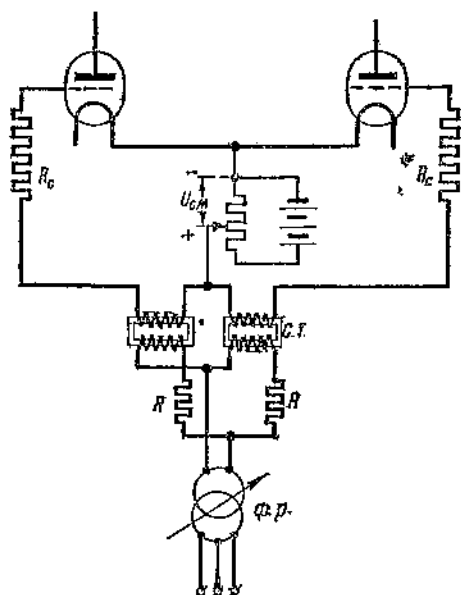
2. Схема с фазорегулятором. Эта схема изображена на фиг. 71, *а*. В этой схеме питание цепи сетки производится через фазорегулятор (заторможенный асинхронный двигатель). Отрицательная полуволна сеточного напряжения дает на сетку запирающее напряжение. Зажигание дуги происходит в тот момент, когда синусоида сеточного напряжения пересекает характеристику зажигания U_c , которая на фиг. 71, *б* ради упрощения показана в виде прямой, параллельной оси абсцисс.

Поворотом фазорегулятора на определенный угол мы смещаем кривую сеточного напряжения относительно кривой напряжения на анодах и тем самым добиваемся задержки зажигания дуги на данном аноде на требуемую часть периода.

Преимущество этого способа по сравнению с предыдущим заключается в большой простоте устройства и обслуживания; недостаток



Фиг. 72. Острая кривая сеточного напряжения.



Фиг. 73. Схема сеточного регулирования с острой кривой сеточного напряжения (импульсное возбуждение). *Ф. р.* — фазорегулятор; *С. Т.* — сеточный трансформатор с большими насыщениями; *R* — сопротивление в первичной цепи *С. Т.*; *R_c* — сеточные сопротивления; *U_{см}* — напряжение смещения.

является менее строгая фиксация точки зажигания, так как при изменении нагрузки или при изменении температуры катодной горловины в ртутных тиратронах изменяется и величина U_c .

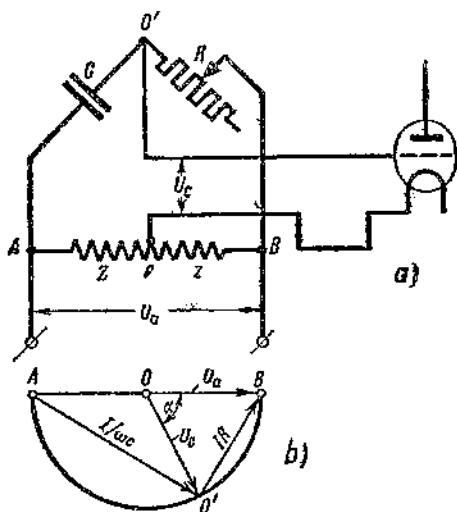
3. Схема с острой кривой сеточного напряжения (импульсное возбуждение). Можно получить четкую фиксацию момента зажигания дуги на анодах и при переменном токе, если заменить синусоидальную кривую сеточного напряжения острой кривой, показанной на фиг. 72.

Кривую сеточного напряжения такой формы можно получить, применяя сеточные трансформаторы (*С. Т.* на фиг. 73) с большим насыщением магнитной системы и, кроме того, включая первичную обмотку трансформаторов последовательно с активным сопротивлением *R*.

При быстром насыщении той части магнитной системы, на которую насажена вторичная обмотка, магнитный поток, пронизывающий эту обмотку, как видно из кривой фиг. 72, резко меняет свою величину только при переходе через нулевые значения, оставаясь примерно постоянным в течение остальной части периода. Периоду резкого изменения потока и соответствует импульс вторичного напряжения.

Для получения запирающего напряжения приходится в данной схеме последовательно с сеточным трансформатором включать источник постоянного тока. Наложение постоянного напряжения $U_{см}$ на импульсную кривую переменного напряжения перемещает нулевую линию последней из *O* в *O'* (фиг. 72).

Эта схема, дающая наибольшую надежность в работе и простоту



Фиг. 74. *a* — схема Гейгера в применении для сеточного управления тиратроном; *b* — векторная диаграмма напряжения.

в обслуживании, является наиболее распространенной схемой для тиратронов, применяемых в силовых цепях.

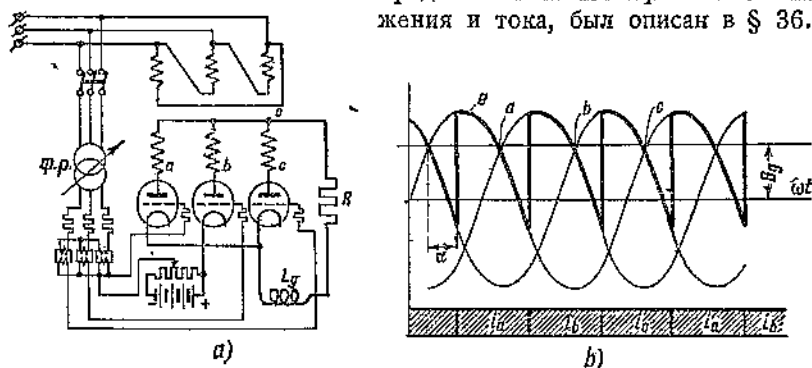
4. Схема Гейгера. Для схем, где тиратрон применяется в качестве автоматического регулятора или реле, нашла себе довольно широкое применение схема, известная под названием схемы Гейгера. Эта схема изображена на фиг. 74, *а*. Основу этой схемы представляет мост Уитстона, в котором в качестве одной пары смежных плеч взяты два одинаковых сопротивления Z , а в качестве другой пары взяты активное сопротивление R и реактивное сопротивление $X_c = \omega C$. Питая концы одинаковых сопротивлений напряжением сети и меняя величину сопротивления R , мы тем самым (см. векторную диаграмму фиг. 74, *б*) фазу напряжения между точками O и O' , к которым приключена цепь сетки, изменяем в пределах от 0 до 180° .

Сеточное напряжение на этой диаграмме определяется вектором U_c , а напряжение в сети — вектором U_a .

43. Схемы применения тиратронов

Схемы применения тиратронов чрезвычайно разнообразны. Поэтому мы ограничиваемся описанием только некоторых, наиболее часто встречающихся схем.

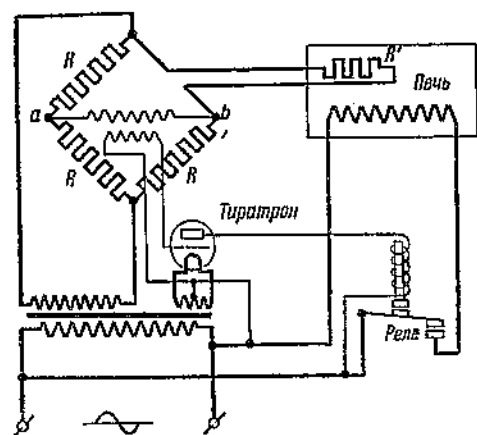
1. Тиратрон как управляемый выпрямитель. Принцип использования тиратрона в схемах выпрямления тока, допускающих регулировку средней величины выпрямленного напряжения и тока, был описан в § 36.



Фиг. 75. *а* — схема управляемого трехфазного выпрямителя с тиратронами; *б* — диаграмма токов и напряжений.

Рабочая схема такого выпрямителя при выпрямлении трехфазного тока показана на фиг. 75. Здесь в каждой фазе вторичной обмотки силового трансформатора включено по одному тиратрону. Катоды всех трех тиратронов электрически между собой связаны и служат положительным полюсом внешней цепи. Отрицательным полюсом цепи служит нулевая точка трансформатора. Дроссельная катушка L_g , включенная в цепь выпрямленного тока, сглаживает пульсации тока. В качестве схемы сеточного управления здесь взята схема с импульсным возбуждением. Сетка каждого тиратрона питается от своей фазы сеточной цепи.

В нулевой провод сеточных трансформаторов, соединенный с катодом, введено через потенциометр отрицательное напряжение, запирающее тиратрон в нерабочую часть периода. Когда импульс переменного напряжения, получаемый от сеточного трансформатора, превышает отрицательное напряжение источника постоянного тока (напряжение смещения), в данном тиратроне зажигается дуга. Диаграмма напряжений и токов для рассматриваемой схемы представлена на фиг. 75, *б* [Л. VII, 9]. Кривые токов даны без пульсации в предположении, что индуктивность в цепи выпрямленного тока достаточно велика. Соотношения напряжений и токов при регулировании сетками нами рассматриваются в § 84.

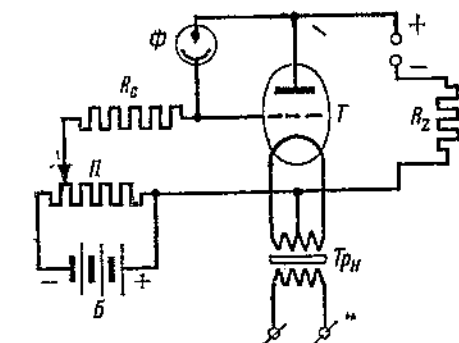


Фиг. 76. Схема с применением термотиратронного реле.

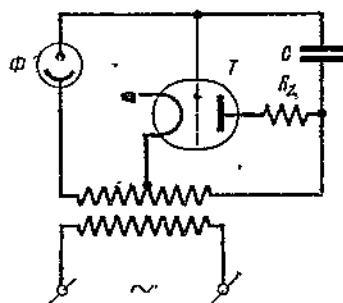
Фиг. 76. Схема с применением термотиратронного реле. Фиг. 76. Схема с применением термотиратронного реле. Фиг. 76. Схема с применением термотиратронного реле. Фиг. 76. Схема с применением термотиратронного реле. Фиг. 76. Схема с применением термотиратронного реле.

2. Термотиратронные реле.

Принципиальная схема такого реле показана на фиг. 76. Здесь одно из сопротивлений R' моста Уитстона представляет собой измерительный элемент схемы. Величина этого сопротивления зависит от температуры печи, в которой оно и расположено. Соотношения сопротивлений в мостике так подобраны, что



Фиг. 77. Схема с фототиратронным реле, работающим как выключатель тока. Φ — фотоэлемент; T — тиратрон; R_1 — сопротивление включаемого в действие прибора; R_2 — сеточное сопротивление; Π — потенциометр; B — батарея, Tr_H — трансформатор накала.



Фиг. 78. Схема с фототиратронным реле, работающим как регулятор тока. Φ — фотоэлемент; C — сеточная емкость; T — тиратрон; R_2 — сопротивление цепи, в которой регулируется ток.

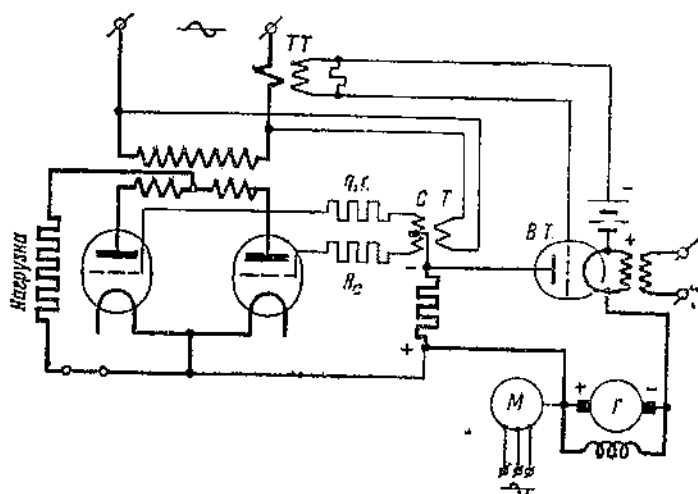
при температурах печи, не выходящих за пределы нормальных, между точками *a* и *b* мостика, к которым приключен сеточный трансформатор

мотор, или вовсе нет напряжения или же оно находится в противоположной фазе с рабочим напряжением.

В таком случае тиратрон тока не пропускает, и цепь нагревательного элемента печи питается током через реле. Если температура печи превосходит допустимые пределы, сопротивление увеличивается настолько, что мы получаем в мостике новое соотношение, при котором сеточная цепь включает тиратрон и реле размыкает цепь нагревательного элемента [Л. VII, 10].

3. Фототиратронные реле. Одна из простейших схем применения фототиратронного реле показана на фиг. 77.

Назначение этой схемы заключается в том, чтобы при попадании луча света в фотоэлемент Φ включался тиратрон T , замыкающий цепь



фиг. 79. Схема сеточной защиты от коротких замыканий и обратных зажигания. C , T . — сеточный трансформатор; B , T . — вспомогательный тиратрон; M - G . — мотор-генератор; T , T . — трансформатор тока.

тока прибора, схематически обозначенного на рисунке в виде сопротивления R_p . Это достигается тем, что нормально, когда фотоэлемент не освещен, сетка тиратрона получает отрицательное напряжение через потенциометр. При освещении фотоэлемента ток, проходящий через фотоэлемент и остальную часть цепи, меняет потенциал на сеточном сопротивлении R_c с отрицательного на положительный и в результате в тиратроне зажигается дуга.

Для непрерывной регулировки тока в зависимости от интенсивности освещения, получаемого фотоэлементом, может быть применена для сеточной цепи схема Гейгера. Такая схема показана на фиг. 78. Здесь фотоэлемент играет роль переменного сопротивления, а нагрузочная цепь, в которой ток должен быть регулируем, включается через тиратрон параллельно одной из половин вторичной обмотки трансформатора. Обе фазы вторичной обмотки трансформатора служат в данном

случае и теми двумя одинаковыми сопротивлениями, которые на схеме фиг. 74 обозначены через Z .

Сеточная цепь (как видно из схемы фиг. 78) включена между средней точкой трансформаторной обмотки и противолежащей вершинной моста.

При изменении освещения фотоэлемента меняется идущий через него ток, и в результате изменяется фаза сеточного напряжения по отношению к фазе рабочего напряжения. Тиратрон, работая в этом случае как управляемый выпрямитель, меняет величину тока в цепи нагрузки в зависимости от интенсивности освещения [Л. VII, 15].

44. Защита сетками от перегрузок и обратных зажигания

Во избежание вредных последствий при перегрузках или обратных зажиганиях газовые выпрямители должны быть быстро отключены от установки.

В мощных установках с этой целью приходится применять дорогостоящие быстродействующие автоматы. Применения этих автоматов можно избежать, если вместо газотронов установить тиратроны, включив их по схеме, показанной на фиг. 79.

При перегрузках, вызванных коротким замыканием или обратным зажиганием, возрастающий в первичной сети ток вызывает увеличение напряжения на сопротивлении, включенном во вторичную обмотку трансформатора тока. Положительный импульс напряжения, передаваемый на сетки вспомогательных тиратронов ($B. T_1$), включает последние и тем самым замыкает сеточную цепь рабочих тиратронов на вспомогательный источник тока, запирая тем самым рабочие тиратроны [Л. VII, 13].

ГЛАВА VIII

РТУТНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

45. Устройство ртутного выпрямителя

Ртутный выпрямитель представляет собой (фиг. 80) вентильный прибор, имеющий в качестве катода 4 ртути.

Одним из преимуществ ртутного катода является его практическая неизнашиваемость, так как ртуть, испаряясь с катода во время работы выпрямителя, вновь возвращается к катоду после конденсации ртутных паров на стенках сосуда и на стенках специально предусмотренного для этой цели конденсационного цилиндра 1.

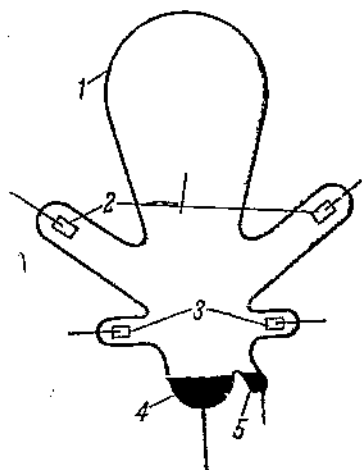
Другим преимуществом ртутного катода является способность его при том дуговом разряде, который имеет место в ртутном выпрямителе, давать неограниченную эмиссию электронов. Это привело к тому, что ртутные выпрямители представляют собой наиболее мощный тип ионного выпрямителя. Наконец, ртутный катод удобен еще и тем, что ртутные пары, испаряющиеся с данного катода, заполняют пространство

внутри выпрямителя, из которого предварительно выкачивается воздух (до $10^{-4} \div 10^{-5}$ mm Hg), и являются весьма подходящей средой для дуги, которая при работе выпрямителя горит между его электродами.

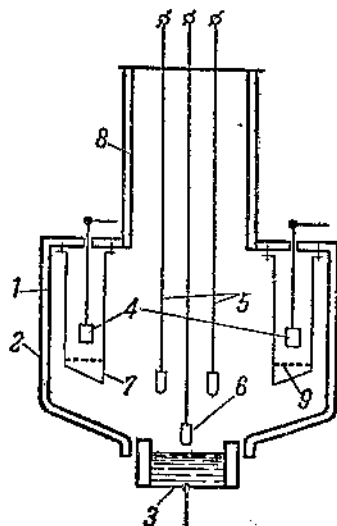
На практике нашли себе применение два типа ртутных выпрямителей:

- 1) стеклянный выпрямитель (фиг. 80);
- 2) металлический выпрямитель (фиг. 81).

Эти типы различаются и по мощности и по конструктивному оформлению. Стеклянные выпрямители: низкого напряжения, строятся в настоящее время на токи до 500—700 А при напряжении до 600 В; высокого напряжения — на токи до 20 А при напряжении до 15 kV.



Фиг. 80. Стеклянный ртутный выпрямитель. 1 — стеклянная колба; 2 — главные рабочие аноды; 3 — аноды возбуждения; 4 — ртутный катод; 5 — анод зажигания.



Фиг. 81. Металлический ртутный выпрямитель. 1 — вакуумный корпус; 2 — водяная рубашка; 3 — катод (ртутный); 4 — главные аноды; 5 — аноды возбуждения; 6 — анод зажигания; 7 — манжета; 8 — конденсационная камера; 9 — деионизационная решетка.

Металлические выпрямители низкого напряжения строятся в настоящее время на токи до 5000—7000 А при напряжении до 600—800 В, высокого напряжения на токи до 200 А при напряжении до 50 kV.

Стеклянный выпрямитель, как это видно из фиг. 80, представляет собой герметически закрытый стеклянный сосуд.

Верхняя расширенная часть сосуда служит для конденсирования паров ртути, испаряющейся с поверхности катода. Нижней части колбы придается такая форма, чтобы капли сконденсировавшейся ртути могли свободно стекать обратно к катоду. К средней части колбы по ее окружности привариваются анодные рукава, в которых располагаются

железные или графитовые аноды. Число рабочих анодов определяется числом фаз трансформатора и мощностью колбы. При токах до 100 А колба изготавливается с двумя (при выпрямлении однофазного тока) и с тремя (при выпрямлении трехфазного тока) анодами.

Ртуть, заполняющая нижнюю (узкую) часть стеклянного сосуда, служит катодом выпрямителя. Ввод к катоду производится также через плотно впаянный в стекло металлический стержень, соединяющийся затем с расположенным в ртути металлическим диском. Кроме главных анодов большинство типов стеклянных выпрямителей имеет также вспомогательные аноды [анод зажигания 5 и аноды возбуждения 3, назначение которых заключается в том, чтобы создать и поддержать вспомогательную дугу в ртутном выпрямителе (§ 50)].

Благодаря полной герметичности стеклянной колбы вакуум, созданный в ней в процессе изготовления, сохраняется и в период эксплуатации выпрямителя.

Для охлаждения маломощных выпрямителей оказывается достаточной естественная циркуляция воздуха. Для выпрямителей средней мощности (от 60 до 200 А) требуется уже искусственное воздушное охлаждение посредством вентиляторов. Для выпрямителей еще большей мощности (выше 200 А) применяются или специальные способы воздушного охлаждения (противодутье) или же такие выпрямители охлаждаются жидкой средой (водой или маслом).

Металлический выпрямитель, показанный на фиг. 81, по своей конфигурации близко подходит к стеклянному выпрямителю и содержит в основном те же детали, которые были перечислены для стеклянного выпрямителя.

Анодные рукава или манжеты 7, в которых расположены рабочие аноды 4, в данном типе выпрямителя введены внутрь вакуумного корпуса. Назначение анодных рукавов заключается в экранировании анодов от непосредственного попадания на них струй ртутного пара, а также в защите данного анода от попадания на него ионов от горящей по соседству дуги (§ 53). Выполнению последней задачи способствуют также и решетки 9.

Катодом выпрямителя служит изолированная от корпуса выпрямителя чашка с ртутью 3.

Кроме главных анодов в данном типе выпрямителя всегда имеются вспомогательные аноды — анод зажигания 6 и аноды возбуждения 5, создающие и поддерживающие вспомогательную дугу в ртутном выпрямителе. Эти аноды также должны быть изолированы от корпуса. Для изоляции их вводов от корпуса требуются изоляторы, в каковых не нуждается стеклянный выпрямитель, поскольку в последнем стекло сосуда дает достаточную изоляцию.

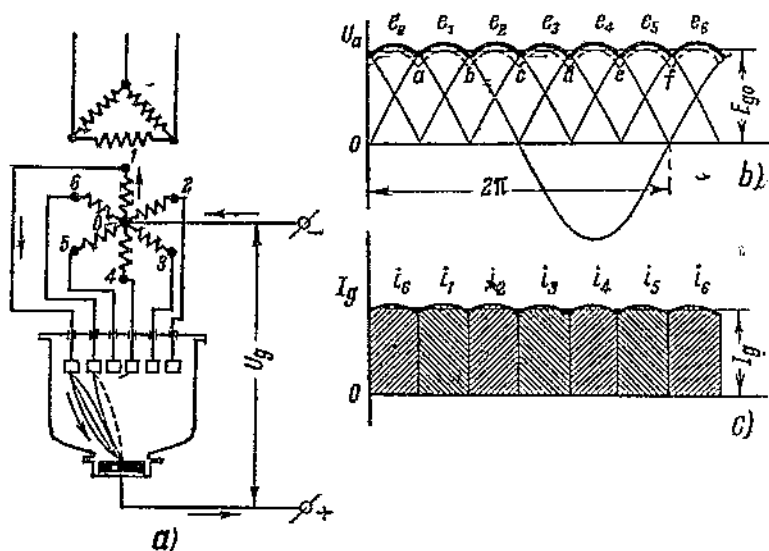
Наличие изоляторов, являющихся неизбежным промежуточным элементом в металлическом выпрямителе, приводит к тому, что его приходится собирать из отдельных неоднородных частей (металл, изолятор). Места стыка этих частей должны быть газонепроницаемы, поэтому оказывается необходимым применять в местах стыка газонепроницаемые прокладки — вакуумные уплотнения. Так как применяемые в настоящее время уплотнения (§ 57), несмотря на большую степень их совер-

шенства, абсолютной герметичности все же не дают, то металлический выпрямитель снабжается постоянно действующей откачивающей установкой, поддерживающей вакуум.

Металлические выпрямители охлаждаются водой из-за большого количества выделяемого в них тепла (вследствие их большой мощности) и сравнительно низкой величины допускаемой температуры. Последнее обусловлено наличием уплотнений.

46. Принцип действия ртутного выпрямителя

Работа ртутного выпрямителя основана на том, что в течение определенной части периода переменного тока между катодом и анодом, имеющим в данную часть периода наивысший потенциал, горит дуга. Дуга, являясь проводником тока внутри выпрямителя, присоеди-



Фиг. 82. Схема шестифазного выпрямления тока. *a* — электрическая схема соединений; *b* — диаграмма напряжений; *c* — диаграмма токов.

няет на эту часть периода цепь нагрузки ($+$ —) (фиг. 82, *a*) к той из фаз вторичной обмотки трансформатора, которая присоединена к данному аноду. В эту часть периода ток проходит через данную фазу и цепь нагрузки (по направлению, указанному стрелкой) за счет того напряжения, которое индуцируется в рассматриваемой фазе обмотки трансформатора.

В следующую часть периода, когда напряжение соседнего анода делается выше, чем напряжение горящего анода (фиг. 82, *b*), дуга автоматически (§ 51) переходит к следующему аноду, замыкая цепь нагрузки ($+$ —) на другой анод, т. е. на другую фазу переменного тока (дуга показана пунктиром). При этом направление тока у потребителя.

в течение всего периода остается неизменным. За один полный период переменного тока дуга обходит все аноды выпрямителя, пропуская в цепь нагрузки постоянный по направлению (выпрямленный) ток (фиг. 82,с). Таким образом дуга в выпрямителе выполняет сразу две функции: во-первых, она создает вентильность в данном приборе, поскольку горение дуги между анодом и катодом возможно лишь в ту часть периода (§ 48), когда анод положителен по отношению к катоду, и, во-вторых, роль дуги сводится к роли гибкого переключателя, присоединяющего цепь нагрузки, связанной с катодом, поочередно к каждому из анодов.

Изучение физического процесса выпрямителя сводится по существу к изучению процессов, которые имеют место в дуговом разряде.

47. Самостоятельный разряд в газах

Дуговой процесс в выпрямителе представляет собой одну из стадий обширного класса разрядов, который носит название самостоятельного разряда. Последний принципиально отличается от того вида разряда, с которым мы встречались в приборах с накалившимся катодом.

В этих приборах наибольшая часть зарядов (электронов), участвующих в переносе электричества от катода к аноду, излучалась катодом за счет той энергии, которая сообщалась ему внешним вспомогательным источником тока (цепью накала). Некоторое количество зарядов мы получали, правда, и в самом разрядном промежутке при ионизации газа, заполняющего этот промежуток, но доля этих зарядов по отношению к общему количеству участвующих в переносе электричества была невелика. Цепь накала играла в этом случае роль внешнего ионизатора.

Внешним ионизатором, обеспечивающим непрерывное возобновление зарядов на катоде или в разрядном промежутке, может также явиться лучистая энергия, как-то: лучи Рентгена, ультрафиолетовые лучи, космическое излучение и т. п., создающие ионы, или путем воздействия на катод (поверхностная ионизация) или же воздействием на самый объем газа (объемная ионизация) [Л. V, 4]. Характерным для всех перечисленных выше разрядов является то, что с прекращением действия ионизатора прекращается и прохождение тока через разрядный промежуток. Такой разряд называется несамостоятельным разрядом.

Дуговой разряд в ртутном выпрямителе относится к другому типу разрядов — к разряду самостоятельному.

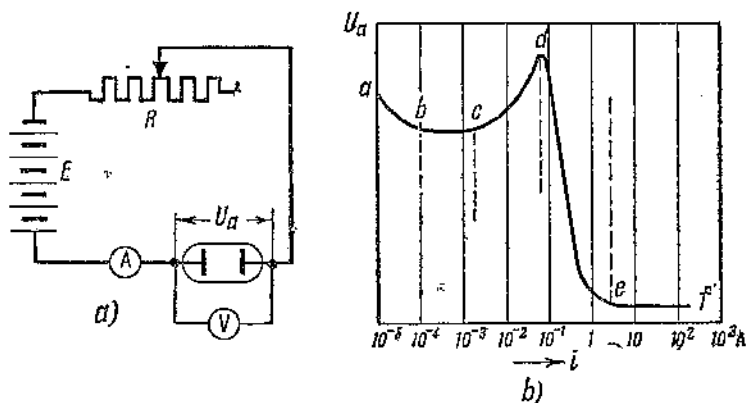
При самостоятельном разряде носители тока — электроны и ионы — возникают непрерывно или на катоде или в разрядном промежутке в ходе самого разряда под действием того поля, которое существует при разряде между электродами.

Характерным для большинства видов самостоятельного разряда является следующий электронно-ионный процесс. Катод в силу ли бомбардировки его ионами, приходящими из разрядного промежутка, или же под действием сильного поля, которое устанавливается непосредственно у катода, излучает электроны. Эти электроны, называемые первичными, под действием сил электрического поля направляются

к аноду. Получив на своем пути нужные скорости, известная часть электронов начинает ионизировать молекулы газа, создавая при этом ионы и вторичные электроны. Первичные электроны вместе с вторичными уходят к аноду, создавая при достаточных скоростях на дальнейшем пути новые, уже третичные, электроны и т. д. Полученные ионы направляются к катоду и повторно создают условия для выхода из него электронов.

Электроны, выходящие таким образом из катода, поддерживают непрерывное течение разряда.

Разряд будет устойчивым в том случае, когда число ионов, образованных в газовом промежутке каждым электроном, вышедшим из катода, будет достаточным для того, чтобы эти ионы, вернувшись к катоду, вновь вызвали уход одного электрона с катода [Л. V, 5]. Если



Фиг. 83. *a* — схема при исследовании самостоятельного разряда; *b* — вольтамперная характеристика самостоятельного разряда.

число ионов окажется недостаточным, разряд пойдет на убыль, и ток будет уменьшаться, если же число создаваемых ионов будет больше того количества, которое требуется для воспроизводства одного электрона, разряд будет усиливаться, и ток в цепи будет возрастать. Это будут неустойчивые режимы самостоятельного разряда.

Рассматривая вначале устойчивые режимы самостоятельного разряда, мы можем говорить о двух его видах: 1) о разряде тлеющем и 2) о разряде дуговом. Оба эти вида самостоятельного разряда можно наблюдать как две последовательные стадии разряда, происходящего между электродами в разреженном газе (фиг. 83, *a*). Зависимость тока от напряжения, получающаяся при таком разряде, представляет собой вольтамперную характеристику самостоятельного разряда в газе [Л. V, 5]. Такая характеристика во всех последовательных стадиях разряда показана на фиг. 83, *b*. Два основных вида разряда определяются на этой характеристике участками *bc* (тлеющий разряд) и *ef* (дуговой разряд). Другие участки на характеристике соответствуют переходным, большей частью неустойчивым, формам разряда. Так, тлеющему разряду, который собственно начинается у точки *b*, предшествует неустойчивая

форма разряда (участок *ab*), называемая иногда тихим, или темным, разрядом. Начальная стадия этого разряда является развитием самостоятельного разряда из несамостоятельного и относится к таунсендовскому разряду.

Участок *de* соответствует переходу от тлеющего разряда к дуговому. Он идет после участка *cd*, соответствующего „аномальному“ (см. ниже) тлеющему разряду¹.

При анализе рабочего режима ртутного выпрямителя, а также других видов ионных выпрямителей, нас интересуют не только два основных вида разряда, но и переходные стадии между ними. Дуговой разряд определяет период прохождения тока между электродами выпрямителя: тлеющий разряд имеет место в период преграждения тока, т. е. в тот период, когда между данными электродами рабочего тока нет. Изучение переходных форм разряда покажет нам, при каких условиях можно ожидать перехода от нормального режима работы выпрямителя к аварийному (обратное зажигание).

Качественные различия физического процесса тлеющего и дугowego разряда сводятся в основном к процессам у катода.

При тлеющем разряде электроны выходят из катода вследствие бомбардировки катода ионами, приходящими из разрядного промежутка, где они создаются вследствие ионизации газовых молекул. Кинетическую энергию, необходимую для отрыва электронов от катода, ионы приобретают, главным образом, при разгоне на близлежащем к катоду участке поля, который определяется „катодным падением напряжения“. На этом участке поле усиливается благодаря концентрации у катода положительного объемного заряда ионов, направляющихся к катоду.

При установившемся тлеющем разряде положительный объемный заряд, создаваемый ионами у катода, подготовлен предыдущими стадиями разряда. Избыток положительных ионов находится в состоянии подвижного равновесия, при котором уходящие к катоду ионы замещаются новыми ионами, приходящими из положительного столба. При этом величина катодного падения напряжения остается для данного газа и материала электродов величиной неизменной (не зависящей от тока).

Значения величины этого „нормального“ катодного падения напряжения для некоторых газов и материалов электрода приведены в табл. 19 [Л. VI, 17].

Устойчивая форма тлеющего разряда характеризуется не только нормальной величиной катодного падения напряжения, но также и нормальной плотностью тока на катоде. За „нормальную“ плотность тока принимают ту плотность тока, которая устанавливается на катоде и остается неизменной до полного покрытия поверхности катода током. Нормальная плотность тока, как показывает опыт, зависит от давления газа, будучи прямо пропорциональна квадрату величины давления.

¹ Все переходные формы разряда (на данной испытуемой трубке с заданным давлением газа) мы можем получить только при определенно подобранных условиях опыта как в отношении материала электродов, так и в отношении давления и рода газа, заполняющего разрядный промежуток.

ТАБЛИЦА 19

Нормальное катодное падение напряжения при тлеющем разряде (в вольтах) для различных материалов катода и различных газов

Газ Материал катода	Воздух	Неон	Аргон	Ртутные пары	Гелий
Ртуть	—	—	—	340	143
Алюминий	229	120	100	245	140
Уголь	—	—	—	475	—
Молибден	—	115	—	353	—
Вольфрам	—	125	—	305	—
Железо	269	150	165	298	150
Никель	226	140	131	275	158
Платина	277	152	131	340	165

Если мы нормальную плотность тока, соответствующую тому или иному давлению, разделим на квадрат величины давления, то мы получим нормальную плотность, приведенную к единице давления. Последняя является величиной, характерной для данного газа и материала катода. Приведенные значения нормальной плотности тока ряда материалов катода даны в табл. 20 [Л. VI, 17].

ТАБЛИЦА 20

Нормальные плотности тока при тлеющем разряде j_n/p^2 в 10^{-6} А/см² (мм Hg)² для различных материалов катода и газов при комнатной температуре

Газ Материал	Воздух	Гелий	Неон	Аргон	Ртутные пары
Медь	24	—	—	—	15
Алюминий	330	—	—	—	4
Железо	—	2,2	6	160	8
Никель	—	~ 2,2	~ 6	~ 160	~ 8
Платина	—	~ 5	18	150	—

После покрытия всей поверхности катода током дальнейший рост тока связан с возрастанием плотности тока на катоде и с одновременным ростом катодного падения напряжения. Этот режим „аномального“ тлеющего разряда соответствует участку *cd* характеристики фиг. 83, б. Режим „аномального“ тлеющего разряда заканчивается у точки *d*, определяемой по максимальному падению напряжения в разрядном промежутке.

За точкой *d* напряжение, несмотря на дальнейший рост тока, начинает резко уменьшаться. Падающий участок характеристики определяет собой неустойчивую переходную стадию от аномального тлеющего разряда к дуговому.

В данной переходной стадии одновременно с уменьшением падения напряжения у катода ток, покрывавший при аномальном тлеющем разряде всю поверхность катода, начинает постепенно стягиваться к одному месту — светящемуся катодному пятну, в котором плотность тока резко возрастает. Переходный процесс заканчивается тогда, когда падение напряжения у катода уменьшается до нескольких десятков вольт или даже до еще меньшей величины.

Малое катодное падение напряжения является основным признаком дугового разряда.

Уменьшение катодного падения напряжения с нескольких сот вольт, которые наблюдаются при тлеющем разряде, до нескольких десятков вольт, которые имеют место при дуговом разряде, связано с изменением процесса, обуславливающего выход электронов из катода.

По современным воззрениям облегченный выход электронов из катода при дуговом разряде обуславливается в одних случаях нагревом катода ударами приходящих к катоду ионов (тепловая эмиссия); в других случаях — воздействием сильного электрического поля, способного непосредственно вырывать электроны из металла (автоэлектронная эмиссия, теория которой разработана Лангмюром). Это поле создается по теории Лангмюра объемными положительными зарядами, концентрирующимися на расстоянии свободного пробега от катода.

Автоэлектронную эмиссию мы получаем при катодах, у которых температура испарения металла лежит ниже температуры, устанавливающейся при горении дуги на катоде, так как в этом случае высокие давления паров у катода дают те малые свободные пробеги, которые необходимы для получения высоких градиентов поля. При холодных катодах градиенты при автоэлектронной эмиссии должны достигать порядка 10^5 — 10^6 В/см [Л. VIII, 1]. К таким катодам в первую очередь относится ртутный катод.

При тугоплавких электродах, какими, например, являются вольфрам, молибден и уголь, имеет место, главным образом, тепловая эмиссия. У катодов, занимающих по температуре плавления и испарения промежуточное место (медь, железо), тепловая эмиссия с автоэлектронной эмиссией действуют совместно.

48. Дуга в ртутном выпрямителе

Мы будем рассматривать процесс в уже сформировавшейся между рабочими электродами дуге (фиг. 84,а), не затрагивая пока вопроса о том, как эта дуга возникла.

Одним из основных показателей протекания физического процесса в дуге выпрямителя является распределение поля вдоль дуги.

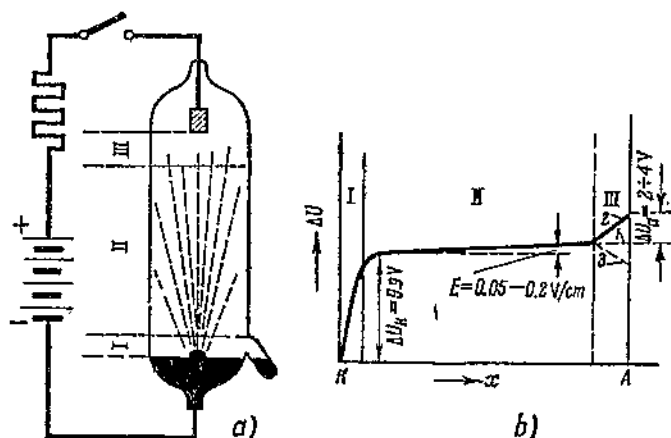
Кривая распределения потенциала, зависящая от пространственного расположения объемных зарядов в разрядном промежутке, изображена на фиг. 84,б. Данная кривая, как и кривая потенциалов в газотроне, может быть разбита на три участка:

- 1) участок у катода (отрезок I на оси абсцисс);
- 2) „положительный столб“ дуги (отрезок II);
- 3) участок у анода (отрезок III).

Физический процесс в последних двух участках дуги в основном тот же, что и в газотроне (см. § 24, а, б и d). Напротив, процесс у катода является характерным именно для дугового самостоятельного разряда, поэтому на рассмотрении этого процесса необходимо остановиться подробнее.

а) Участок у катода. Источником электронов, поддерживающих дугу, является светящееся катодное пятно.

Выход электронов из пятна обуславливается, главным образом, действием электрического поля, образованного положительным объемным зарядом ионов, находящихся примерно на расстоянии свободного пробега от катода. Этот заряд у катода поддерживается устойчиво, так как на место уходящих к катоду ионов из положительного столба



Фиг. 84. Схема процесса в дуге (а) и распределение потенциала в ней (б).

дуги приходят новые ионы. Между объемным положительным зарядом и катодом устанавливается определенная разность потенциалов — катодное падение напряжения, которое, как показал ряд исследований, не зависит ни от величины нагрузочного тока, ни от давления газа или паров ртути в сосуде выпрямителя. По последним измерениям Комптона и Лямара [Л. VIII, 2] катодное падение напряжения в ртутном выпрямителе равно 9,9 V.

Под действием этой разности потенциалов ионы ускоренно направляются к катоду, отдавая ему свою потенциальную и кинетическую энергию, а электроны направляются от катода к положительному столбу, запасая энергию, необходимую для ионизации в положительном столбе дуги.

По измерениям Комптона [Л. VIII, 3] доля ионного тока на участке у катода составляет примерно 10—20% от общего тока нагрузки. Общая плотность тока в катодном пятне весьма велика и достигает до 2 000 А/см² [Л. VIII, 3]. Это обуславливает относительно малую поверхность катодного пятна.

Температура катодных пятен по соображениям Компрона [Л. VIII, 3] равна примерно 200°C , в то время как температура остальной массы ртути катода колеблется в зависимости от условий охлаждения в пределах от 80 до 100°C .

Температура ртути в 200°C — совершенно недостаточная для тепловой эмиссии электронов, вызывает, однако, весьма сильное испарение ртути, благодаря тому, что ртуть находится под вакуумом. Струи ртутных паров, уходящие с катодных пятен, отклоняют поток ионов, направляющихся к катоду, и поэтому места выхода электронов — катодные пятна — непрерывно перемещаются. Средняя скорость перемещения катодного пятна равна примерно 10 м/сек .

При токах, превышающих несколько сот ампер, эмиссия электронов с катода идет не из одного катодного пятна, а из ряда произвольно перемещающихся по поверхности ртути катодных пятен.

Вследствие интенсивного процесса возбуждения и ионизации паров ртути электронами, выходящими из катодного пятна, и следующего за этим излучения энергии при восстановлении нормальных атомов пленка паров перед пятном сильно светится. Это свечение в прежних исследованиях приписывали непосредственно поверхности катодного пятна и поэтому на основе оптических измерений ошибочно считали температуру катодного пятна равной 2000°C и выше.

Для обеспечения непрерывного существования катодного пятна ток в дуге не должен ни на одно мгновение падать ниже определенного минимума ($3\text{--}5\text{ А}$). Снижение тока ниже указанных значений хотя бы на микросекунды неизбежно ведет к потуханию пятна. Этот факт и обуславливает потребность в вспомогательной дуге, непрерывно поддерживаемой вспомогательными анодами (дуга возбуждения).

Непрерывно существующее катодное пятно благодаря дуге возбуждения обеспечивает готовность к переходу дуги на рабочие аноды в любой момент времени, когда это требуется внешней цепью потребителя.

б) Столб дуги. Процесс в столбе дуги в выпрямителе с жидким катодом мало чем отличается от соответствующего процесса в столбе дуги в выпрямителе с накалимым катодом (§ 24, а и б). И здесь выходящие из катода и поступающие в плазму дуги электроны, сталкиваясь с нейтральными молекулами паров ртути, в значительной части теряют направленность своего движения, начиная, как и молекулы ртути, заполняющие разрядный промежутки, двигаться беспорядочно.

Наиболее быстрые электроны из беспорядочно перемещающихся в положительном столбе электронов, сталкиваясь с атомами паров ртути, ионизируют их, создавая ионы и новые электроны. Ионы, полученные в результате такой ионизации, компенсируют объемный заряд электронов, в связи с чем градиент потенциала в столбе весьма невелик.

Так как ионы и равное им число электронов непрерывно отсасываются стенками (§ 24, б) и, кроме того, часть ионов уходит к катоду, то для восстановления требуемой по условиям разряда концентрации ионов ионизация в положительном столбе должна непрерывно поддерживаться, и это обуславливает определенный градиент потенциала в столбе дуги

[Л. VIII, 4, 5, 6]. Величина этого градиента может быть определена тем же методом, который был указан в § 24, б, и, следовательно, для определения численного значения градиента мы можем воспользоваться формулой (VI, 11).

$$E = \frac{2P_0}{RJ_n},$$

если пренебречь (неизвестной пока) составляющей энергии, теряемой на излучение. Удельная энергия, воспринимаемая каждым кв. сантиметром стенки от нейтрализующихся на ней зарядов P_0 , подсчитывается по-прежнему по сумме отдельных составляющих (см. пример к § 24, б)

$$P_0 = P_i + P_s + P_t = (U_i + U_s + U_t)j_i.$$

Подставляя значение P_0 в выражение для E , мы получаем

$$E = \frac{2}{R} (U_i + U_s + U_t) \frac{j_i}{j_{n.a}}. \quad (\text{VIII, 1})$$

Пример. Для дуги в ртутных парах при $p = 5-6 \mu \text{ Hg}$ мы на основе фиг. 36 можем принять температуру электронов $T_e = 20\,000^\circ \text{K}$. Для этой температуры по кривой фиг. 37 мы получаем $\frac{j_e}{j_{n.a}} \approx 4$, и зная [см. формулу (VI, 6)], что $\frac{j_e}{j_i} \approx 400$, мы получаем, что

$$\frac{j_i}{j_{n.a}} = 0,01.$$

Из суммы, стоящей в скобках:

$$1) U_i = \frac{2kT_e}{e} + \frac{2kT_i}{e} = 4,3 \text{ V},$$

если принять $T_i = \frac{1}{4} T_e = 5\,000^\circ \text{K}$;

$$2) U_s = \frac{6,06 \cdot T_e}{11\,600} = 10,5 \text{ V} \text{ [см. формулу (VI, 10)];}$$

$$3) U_t \text{ для ртути равно } 10,4 \text{ V}.$$

Суммируя отдельные составляющие и подставляя значение этой суммы, а также и отношение $\frac{j_i}{j_{n.a}}$ в формулу (VIII, 1), мы получаем

$$E = \frac{2 \cdot 25,2}{100 \cdot R} = \frac{0,504}{R} = \frac{1,08}{D}. \quad (\text{VIII, 2})$$

По данной приближенной формуле мы можем подсчитать градиент потенциала в ртутной дуге, если давление паров отвечает $5-6 \mu \text{ Hg}$. Так, например, при диаметре манжеты $D = 15 \text{ см}$ и длине дуги в манжете $l = 45 \text{ см}$ падение напряжения в манжете будет

$$\Delta U_n = E \cdot l = \frac{1,08}{15} 45 = 3,24 \text{ V}.$$

При определении полного падения в дуге к вычисленной величине необходимо добавить еще падение напряжения на остальном участке пути дуги до катода, а также добавочное падение напряжения, которое наблюдают в местах, где сечение дуги суживается. К таким местам относится место входа дуги в манжету и решетку или сетку внутри манжеты.

Нормальный градиент потенциала (0,05—0,02 В/см) сохраняется до тех пор, пока на пути дуги плотность пара достаточна, чтобы обеспечить количество ионов, требуемое для компенсации объемного отрицательного заряда. При чрезмерной или недостаточной плотности паров ртути или при слишком большой плотности тока падение в дуге делается зависимым и от тока и от плотности паров, имея тенденцию к возрастанию, при росте плотности тока и при уменьшении плотности паров ртути.

с) Участок у анода. Явления у анода ртутного выпрямителя те же, что и в газотроне. В зависимости от размеров анода мы можем иметь у анода переходную оболочку того или иного знака (§ 24, d) и в зависимости от этого тот или иной ход кривой напряжения на участке у анода (варианты 1, 2 и 3 на фиг. 84, б).

д) Потенциал корпуса. С вопросом о распределении напряжения в дуге выпрямителя связан также вопрос о потенциале корпуса и, следовательно, всех металлических частей, электрически связанных с корпусом выпрямителя.

Так как при горении дуги заряды, направляющиеся к стенкам из столба дуги, электрически связывают корпус выпрямителя с дугой, то корпус выпрямителя обычно принимает потенциал одной из промежуточных точек дуги.

Это обстоятельство обязывает отнестись с большим вниманием к вопросу о потенциалах в выпрямительной цепи. Если заземлена нулевая точка трансформатора (см. схему фиг. 82), то весь корпус получает потенциал, измеримый по отношению к земле полным рабочим напряжением. При заземлении катода потенциал корпуса по отношению к земле не превышает падения напряжения в дуге.

49. Падение напряжения в дуге выпрямителя

Суммируя падения напряжения на отдельных участках дуги, мы получаем полное падение напряжения в дуге ртутного выпрямителя

$$\Delta U_g = \Delta U_k + E \cdot l + \Delta U_a; \quad (\text{VIII, 3})$$

здесь ΔU_k — катодное падение напряжения;

E — градиент потенциала в столбе дуги;

l — длина дуги;

ΔU_a — анодное падение напряжения.

Как показывает опыт, значения полного падения напряжения в дуге ртутного выпрямителя колеблются в пределах от 20 до 30 В. Эти колебания зависят от величины нагрузочного тока, плотности ртутных паров в выпрямителе и, наконец, от размеров анодных рукавов и лежащих на пути дуги решеток, если таковые имеются.

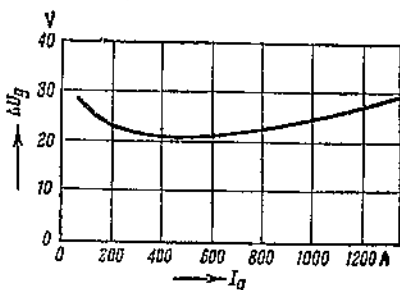
Кривая, приведенная на фиг. 85, показывает, что вначале падение напряжения в дуге с ростом нагрузки уменьшается, а затем вновь начинает расти [Л. VII, 15].

Это объясняется тем, что вначале по мере увеличения плотности тока растет плотность метастабильных атомов, вследствие чего снижается градиент потенциала в столбе; при дальнейшем возрастании нагрузки это снижение напряжения компенсируется количественно значительно более заметным возрастанием так называемого „переходного“ падения напряжения, которое образуется в местах, где дуга, ограниченная стенками или решетками, вынуждена менять свое сечение. В известной мере на увеличение падения напряжения в дуге с ростом нагрузки влияет также возрастающее с нагрузкой анодное падение напряжения.

Названный выше диапазон для падения напряжения в дуге соответствует оптимальной плотности пара в выпрямителе, которая определяется рабочей температурой корпуса в пределах от 35 до 55° С.

При недостаточной плотности пара при нормальной нагрузке или при нормальной плотности пара при перегрузках падение напряжения может сильно возрасти за счет недостаточной компенсации ионами объемного заряда электронов.

Если рабочий ток распределяется на два параллельно работающих анода, то падение в дуге при том же общем нагрузочном токе меньше.



Фиг. 85. Кривая падения напряжения в дуге ртутного выпрямителя.

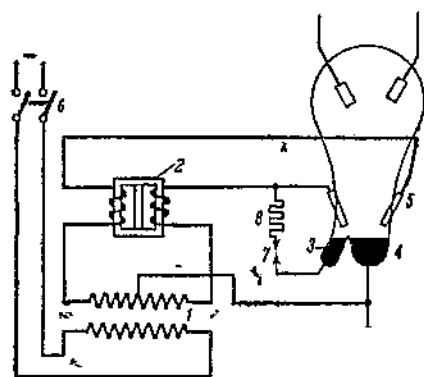
50. Зажигание и поддержание дуги в выпрямителе

Мы видели, что основным фактором, обуславливающим существование дуги между рабочими электродами в выпрямителе, является надувающее электроны пятно на катоде. При наличии такого пятна электроны, устремляясь к аноду, имеющему положительный потенциал по отношению к катоду, формируют на своем пути дугу. Поэтому готовность к действию выпрямителя в любой момент времени (когда это требуется условиями работы внешней цепи) может быть обеспечена или при непрерывном существовании катодного пятна (что достигается непрерывным горением вспомогательной дуги) или же тем, что такое пятно автоматически создается в каждый полупериод положительного напряжения на рабочих анодах.

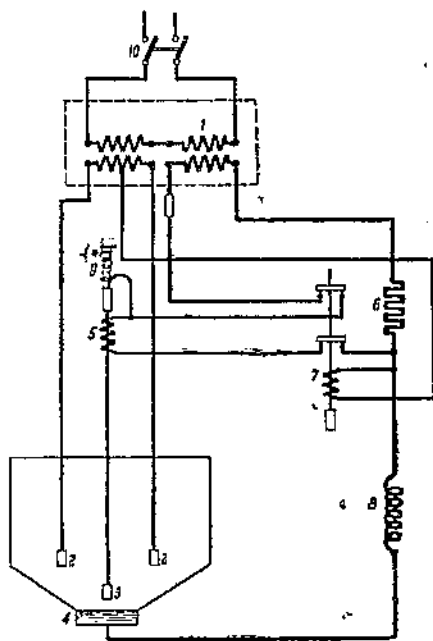
В ртутных выпрямителях нормального типа пользуются первым способом поддержания пятна. Зажигание дуги производится при помощи вспомогательного анода, так называемого анода зажигания. Дальнейшее горение дуги поддерживается двумя (а иногда и тремя) анодами возбуждения, питаемыми от специального трансформатора.

Схема зажигания и возбуждения, применяемая обычно в стеклянных выпрямителях, показана на фиг. 86. В данном типе выпрямителя ано-

дом зажигания 3 служит ртуть, заполняющая отросток в нижней части колбы (рядом с катодом). При легком наклоне колбы между ртутью анода зажигания и ртутью катода 4 образуется проводящий мостик, по которому проходит ток от вторичной обмотки трансформатора возбуждения 1, если нажата кнопка 7 и замкнут рубильник 6. При восстановлении нормального положения колбы ртутный мостик разрывается и в месте разрыва образуется вспомогательная дуга, которая тотчас же переходит на один из анодов возбуждения 5 (поскольку последние также находятся под напряжением). Так как дуга на анодах возбуждения шунтирует цепь анода зажигания, то с ее появлением дуга на аноде зажигания гаснет.



Фиг. 86. Схема возбуждения и зажигания в стеклянном ртутном выпрямителе. 1 — трансформатор возбуждения и зажигания; 2 — анодный дроссель; 3 — анод зажигания; 4 — катод; 5 — аноды возбуждения; 6 — рубильник; 7 — кнопка зажигания; 8 — ограничительное сопротивление.



Фиг. 87. Схема возбуждения и зажигания металлического ртутного выпрямителя. 1 — трансформатор возбуждения и зажигания; 2 — аноды возбуждения; 3 — анод зажигания; 4 — катод; 5 — соленоид; 6 — ограничительное сопротивление; 7 — реле; 8 — реактивная катушка; 9 — пружина; 10 — рубильник.

Переходя с анода на анод, дуга возбуждения поддерживает непрерывное существование катодного пятна. Для предупреждения спада тока ниже критического значения (3—5 А) в цепь анодов возбуждения включена реактивная катушка 2.

Схема возбуждения и зажигания дуги в металлическом ртутном выпрямителе показана на фиг. 87. В данном выпрямителе металлический анод зажигания 3 подвешен на пружине 9 к верхней крышке конденсационного цилиндра и нормально не касается ртути 4. При включении рубильника 10 одновременно с анодами возбуждения 2 получает напряжение и соленоид 5. Этот соленоид втягивает связанный с анодом зажигания сердечник, действуя против сил натяжения пружины. При

этом анод зажигания погружается в ртуть и по цепи этого анода начинает проходить ток. Одновременно шунтируется цепь соленоида, имеющего заметно большее сопротивление, нежели цепь, образованная анодом зажигания; в результате ток в соленоиде уменьшается, и пружина вынуждает анод выйти из ртути.

Образующаяся при нарушении контакта между анодом зажигания и ртутью дуга, как и в предыдущем случае, тотчас же переходит на аноды возбуждения.

При переходе дуги на аноды возбуждения через реле 7, включенное в цепь катода, начинает протекать ток, вследствие чего размыкается цепь соленоида и анода зажигания. Этим предупреждается повторное включение анода зажигания при протекании тока через аноды возбуждения. Сопротивление 6 служит для ограничения импульса тока в цепи зажигания. Реактивная катушка в цепи катода 8 служит для предупреждения возможности спада тока в цепи возбуждения к нулю.

51. Переход дуги с анода на анод

При наличии катодного пятна дуга на рабочих анодах появляется тотчас же после того, как замыкается цепь нагрузки и аноды оказываются под напряжением.

Первым анодом, получающим рабочую дугу, является анод, имеющий в момент включения внешней цепи наивысший положительный потенциал относительно катода, поскольку между этим анодом и катодом будет наиболее сильное поле. Потенциал катода выпрямителя отличается от потенциала работающего анода лишь на небольшую величину падения напряжения в дуге (20—25 V). Поэтому с момента зажигания дуги потенциал катода оказывается более высоким, чем потенциалы всех других (кроме работающего) анодов. В силу этого другие аноды в данную часть периода работать не могут. Когда потенциал очередного (по следованию фаз) анода делается равным потенциалу работающего анода, наступает момент начала перехода дуги на очередной анод.

Такие моменты на диаграмме напряжений фиг. 82 отмечены точками *a*, *b*, *c*, *d* и т. д. Так в точке *a* дуга переходит с шестого анода на первый, в точке *b* — с первого анода на второй, в точке *c* — со второго анода на третий и т. д. Моменты перехода дуги соответствуют точкам пересечения полусинусоид в том случае, если напряжение зажигания дуги в точности равно напряжению горения дуги и если индуктивности в цепях анодов не препятствуют резкому изменению тока.

Обычно приходится считаться с влиянием обонх указанных факторов.

Напряжение зажигания дуги нормально на 3—5 V выше напряжения горения; это ведет к тому, что точки зажигания на диаграмме передвигаются несколько вправо.

Если напряжение зажигания заметно выше напряжения горения, то это свидетельствует о затрудненном зажигании. Последнее имеет место:

1) при недостаточной плотности ртутных паров (низкая температура стенок корпуса), не обеспечивающей требуемой концентрации ионов;

2) при наличии узких анодных рукавов, густых решеток или сеток, отнимающих много ионов при формировании разряда.

Влияние индуктивности на условия перехода дуги с анода на анод сказывается еще больше. Это влияние рассматривается нами подробно в § 79.

52. Ртутный выпрямитель с управляющей сеткой

При введении в ртутный выпрямитель сетки, конструкция которой для стеклянного выпрямителя показана на фиг. 99, а для металлического на фиг. 106, мы получаем возможность регулировать начало разряда на анодах выпрямителя точно так же, как мы это могли делать в приборах с накаливаемым катодом (тиратронах).

Такое регулирование разряда открыло целый ряд новых применений ртутного выпрямителя, фактически превратив ртутный выпрямитель в универсальный преобразователь тока.

Здесь мы рассмотрим только применение сетки для регулирования выпрямленного напряжения. Этот процесс в ртутном выпрямителе повторяет аналогичный процесс в тиратроне (§ 36). На фиг. 88 ряд последовательных диаграмм напряжения показывает кривую выпрямленного напряжения для шестифазного выпрямителя при разных углах регулирования α , отсчитываемого нами от точки естественного зажигания анодов, при отсутствии регулирования (точки a, b, c и d на фиг. 82). Нижние кривые под каждой из диаграмм фиг. 88 представляют собой кривые сеточного напряжения.

Среднее значение выпрямленного напряжения (холостого хода) определяется в этом случае по формуле

$$E_g = V\sqrt{2} E_2 \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{+\frac{\pi}{m} + \alpha} \cos x \, dx = \frac{V\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} \cos \alpha \quad (\text{VIII, 4})$$

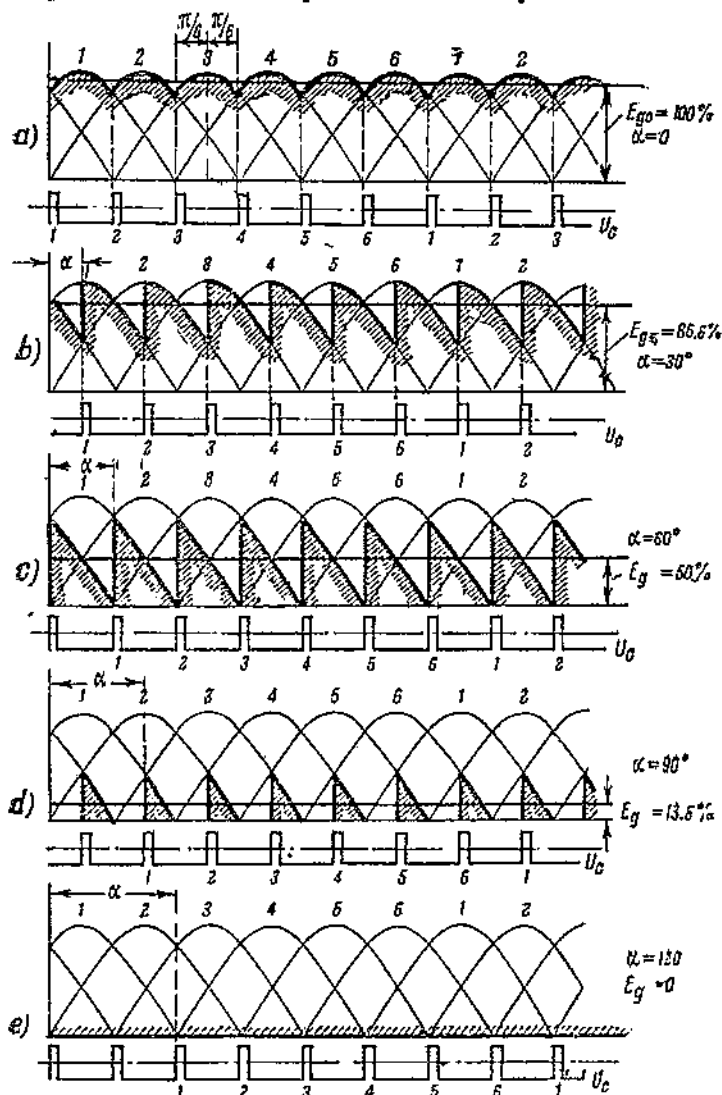
или, принимая во внимание формулу (II, 23), мы получаем

$$E_g = E_{g0} \cos \alpha^1, \quad (\text{VIII, 4'})$$

эта формула и диаграмма на фиг. 88 показывают, что по мере увели-

¹ Формулы (VIII, 4) и (VIII, 4') верны до тех пор, пока анод имеет нормальную продолжительность горения $\frac{2\pi}{m}$, т. е. пока кривая выпрямленного тока не имеет разрывов. В диаграмме фиг. 88 это имеет место для углов $\alpha \leq 60$. Формулы при прерывающейся кривой тока см. § 84.

чения угла α , среднее значение выпрямленного напряжения E_g , а вместе с ним и среднее значение выпрямленного тока уменьшаются.



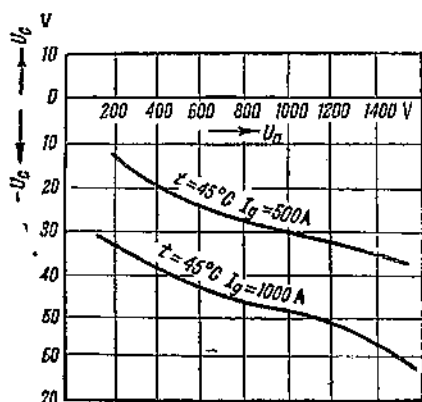
Фиг. 88. Линейные диаграммы напряжений при сеточном регулировании.

Физические процессы, которые имеют место у сетки при регулировании разряда в ртутном выпрямителе, ничем принципиально не отличаются от процессов, которые имеют место у сеток тиратронов.

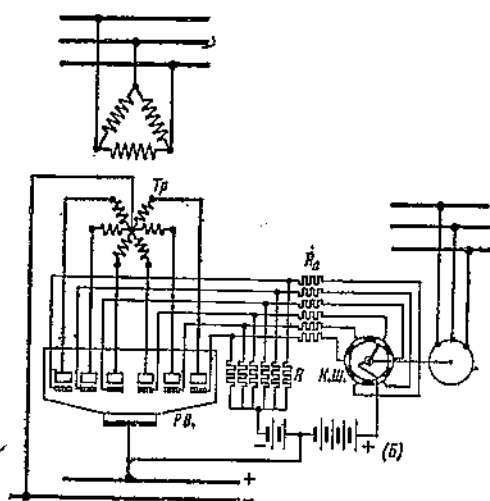
Количественная разница этих процессов обуславливается лишь тем, что в период преграждения тока ионная оболочка у сеток ртутного

выпрямителя значительно плотнее (больше ионов в 1 см^2), чем у сеток тиратронов (§ 35), вследствие непрерывного притока ионов к сетке

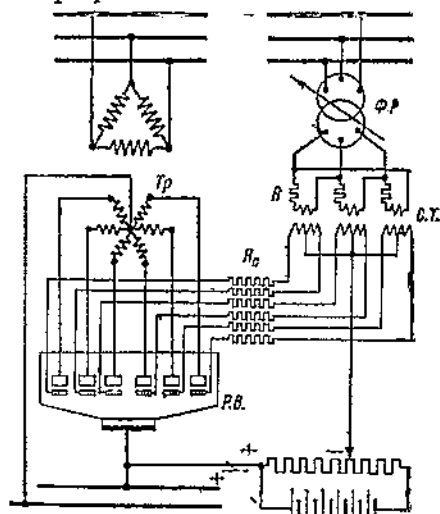
от дуги, горящей на соседнем аноде. Это сказывается на увеличении отрицательного запирающего потенциала сеток U_c с нескольких десятков вольт (фиг. 89). Влияние притока ионов от горящей по соседству дуги сказывается также и на зависимости пусковой характеристики от величины нагрузочного тока. Как показывают пусковые характеристики на фиг. 89, отвечающие токам нагрузки $I_a = 500 \text{ А}$ и $I_a = 1000 \text{ А}$, эта зависимость в ртутных выпрямителях значительно больше, чем в ртутных тиратронах. Температурные влияния на пусковые характеристики в ртутных выпрямителях примерно те же, что и в ртутных тиратронах.



Фиг. 89. Пусковые характеристики сеток ртутного выпрямителя.



Фиг. 90. Схема сеточного управления с контактной шайбой: Tr — главный трансформатор; $P.B.$ — ртутный выпрямитель; $K.Ш.$ — контактная шайба; B — сеточная батарея; R_c — сеточные сопротивления; R — сопротивление.



Фиг. 91. Схема сеточного управления с острой кривой напряжения (импульсное возбуждение). Tr — главный трансформатор; $P.B.$ — ртутный выпрямитель; $\Phi.P.$ — фазорегулятор; $C.T.$ — сеточные трансформаторы с магнитным насыщением; B — сеточная батарея; R — добавочные сопротивления; R_c — сеточные сопротивления.

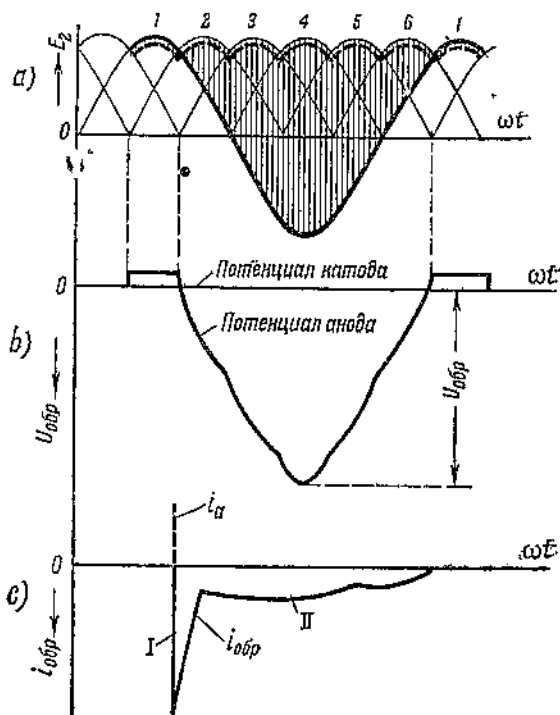
Для сеточного управления у ртутных выпрямителей применяются те же схемы, что и у тиратронов (§ 42). На фиг. 90 показана схема

сеточного управления с контактной шайбой для шестифазного выпрямителя. В данной схеме сеточная цепь питается постоянным током. Зажигание очередного анода происходит в тот момент, когда отрицательный потенциал на сетке заменяется положительным потенциалом (см. диаграмму напряжений для сеточной цепи на фиг. 88). На фиг. 91 показана схема с фазорегулятором $\Phi.P.$ и сеточными трансформаторами $C.T.$, дающими острую кривую сеточного напряжения (§ 42, 3 и фиг. 72). Здесь цепь сеток питается переменным напряжением. Вспомогательный источник тока (батарея B) в этой схеме дает отрицательное напряжение, требующееся для запыливания разряда. При желании использовать для сеточного регулирования чисто синусоидальное напряжение (см. § 42, 2 и фиг. 71) вспомогательный источник тока в схеме не нужен; не нужны также сеточные трансформаторы, если обмоточные данные фазорегулятора отвечают требуемым величинам сеточного напряжения и вторичная обмотка фазорегулятора имеет выведенную нулевую точку.

53. Обратный ток. Обратное зажигание

Дуга на данном аноде горит, как мы видели, до тех пор, пока этот анод положителен по отношению к катоду и напряжение между анодом и катодом больше, чем напряжение горения дуги. Как только напряжение становится меньше, дуга на данном аноде гаснет и наступает непроводящая часть периода. Если произвести точные (осциллографические) измерения, то оказывается, что и в эту, так называемую непроводящую часть периода через анод также проходит ток (фиг. 92, c), хотя и весьма незначительный по величине по сравнению с рабочим током. Ток этот имеет направление, обратное рабочему току, и потому называется обратным током.

Носителями обратного тока в выпрямителе являются помимо ионов, оставшихся после распада столба дуги, горевшей на данном аноде, еще ионы, диффундирующие от горящих по соседству дуг, поскольку



Фиг. 92. Кривая обратного тока c и обратного напряжения b , построенная на основании диаграммы напряжения a .

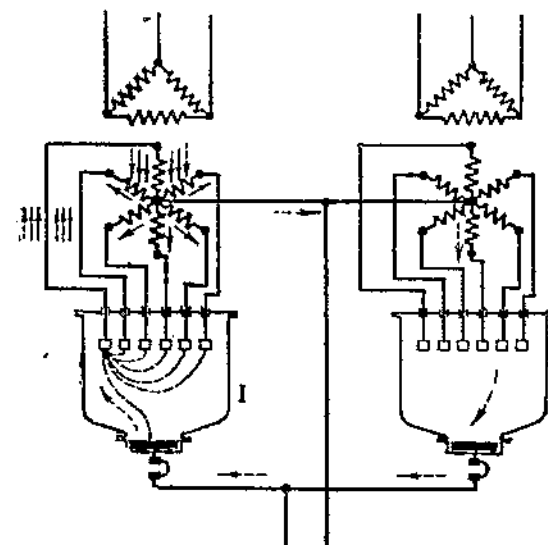
данный анод отрицателен по отношению к горящей дуге. Эти два источника ионов и определяют ход кривой обратного тока.

Первый участок кривой, характеризующейся резким подъемом кривой обратного тока, обуславливается, главным образом, ионами, являющимися продуктом распада дуги. Второй более пологий участок кривой обуславливается ионами, диффундирующими от горящей по соседству дуги и отчасти током тлеющего разряда, который в данную часть периода при достаточно высоких напряжениях имеет место между анодом и катодом.

Величина и форма обоих участков кривой обратного тока находятся в известной зависимости от хода кривой обратного напряжения,

т. е. напряжения, которое имеет данный анод по отношению к катоду в нерабочую часть периода. Такая кривая для шестифазного выпрямителя дана на фиг. 92, б. Эта кривая построена по кривым фиг. 92, а.

При нормальных условиях работы максимальное значение обратного тока обычно не превосходит величины порядка 100—200 мА; среднее же значение этого тока не превосходит 10—20 мА. Такой ток не имеет, естественно, никакого практического значения для внешней цепи; однако он является очень серьезным показателем внутреннего состояния выпрямителя.



Фиг. 93. Схема токопрохождения во время обратного зажигания при параллельной работе.

Действительно, если обратный ток выходит за указанные нормальные для него пределы, то вследствие усиленной бомбардировки анодов ионами может начаться настолько заметная эмиссия электронов с анодов, что в результате на одном или нескольких анодах может образоваться катодное пятно, связанное с зажиганием дуги в обратном направлении в выпрямителе (фиг. 93). Этот процесс носит название обратного зажигания.

Обратное зажигание является аварийным режимом для выпрямителя, так как оно связано: 1) с нарушением вентильного действия выпрямителя; 2) с коротким замыканием (через дугу несколько одновременно работающих анодов) вторичной обмотки трансформатора (выпрямитель I на фиг. 93); 3) с нарушением параллельной работы выпрямителей, если поврежденный выпрямитель работает параллельно с другими (выпрямитель II с выпрямителем I на фиг. 93).

В результате обратного зажигания ртутного выпрямителя могут явиться: 1) порча вакуума вследствие более сильного выделения газов стенками и анодами; 2) оплавление анодов вследствие перегрузки их током. Для трансформатора обратное зажигание опасно с точки зрения тех механических усилий, которые имеют место из-за ненормально больших токов.

Поэтому основная задача при расчете и конструировании выпрямителя заключается в том, чтобы дать, насколько это осуществимо, конструкцию, в которой обратные зажигания были бы исключительно редким явлением. Малая вероятность обратных зажиганий является одним из наиболее серьезных показателей совершенства выпрямителя.

54. Причины обратных зажиганий и их устранение

Этот вопрос в достаточной мере еще к настоящему времени не изучен, но ряд имеющихся опытных исследований [Л. VIII, 9] говорит о том, что непосредственными причинами обратных зажиганий в ртутном выпрямителе могут явиться:

1. Наличие в материале анода нежелательных примесей щелочных и щелочно-земельных металлов, обладающих малой работой выхода электронов. Предупреждение этого дефекта требует не только тщательной очистки материала анода при изготовлении его, но и особой чистоты при сборке анодов на заводе и при демонтаже выпрямителя на месте установки (непосредственно руками трогать аноды не разрешается). Для предупреждения возможности получения облегченной работы выхода электронов из анода следует также избегать соприкосновения нагретого металла анода с изоляторами.

2. Слишком высокая плотность паров ртути в области анода. При большой плотности пара у анода усиливается плотность тока тлеющего разряда и, кроме того, ухудшается диффузия ионов к стенке. В результате большая часть ионов идет к аноду, повышая диффузионный ток.

Повышенная плотность пара может явиться или следствием общего повышения давления паров ртути в выпрямителе из-за высокой температуры катода или же вследствие конденсации паров на более нагретых близких к аноду частях выпрямителя. Резкое повышение давления пара может быть вызвано также испарением с горячего анода капель ртутного конденсата, попавшего на анод в тот период, когда анод был холодным.

Защитой от непосредственного попадания капель ртути на анод в металлическом ртутном выпрямителе служит манжета, окружающая каждый из анодов выпрямителя (фиг. 81). В стеклянных выпрямителях роль манжеты выполняют длинные вынесенные вне конденсационного цилиндра выпрямителя анодные рукава.

Предупреждение конденсации ртутных паров непосредственно на аноде достигается тем, что тепловой режим анодов и манжет рассчитывается на заметно более высокую температуру по сравнению с той температурой, которую имеют остальные части вакуумного корпуса. Эта же мера обеспечивает и относительно меньшую плотность паров

в области анода. Наиболее приемлемым температурным режимом для анодов является температура в 500—700°С. Температуры, лежащие ниже указанного предела, ведут, как показали опытные исследования, к более частым обратным зажиганиям, температуры же, более высокие, недопустимы из-за начинающегося заметного испарения металла.

Для того чтобы свести к минимуму конденсацию паров ртути на анодах, происходящую при вынужденных остановках выпрямителя в процессе эксплуатации, система охлаждения выпрямителя должна быть так выполнена, чтобы аноды и анодные манжеты остывали в последнюю очередь. Кроме того, при включении переохлажденного выпрямителя в работу рекомендуется, если это возможно, предварительно прогреть аноды или теплой водой или дать на выпрямитель вначале неполную нагрузку.

3. Ненормально большая плотность посторонних газов, в том числе и воздуха в выпрямителе. Это может быть вызвано общим или

местным ухудшением вакуума в выпрямителе вследствие выхода (отдачи) окклюдированных газов металлом или графитом анода, а также стенками сосуда, или же вследствие течи в анодных вводах.

Поэтому необходимо иметь хорошо работающие насосы и вести регулярное наблюдение за состоянием вакуума; кроме того необходимо, чтобы было произведено тщательное обезгаживание анодов до посадки их в вакуумный корпус и обезгаживание корпуса в нагретом состоянии.

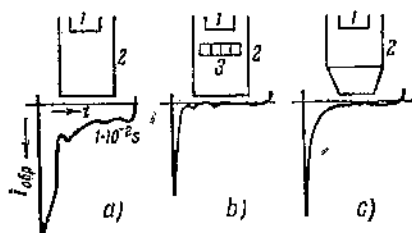
Последняя операция носит название формовки выпрямителя (§ 76).

4. Интенсивный приток ионов от соседней дуги к данному аноду. В этом случае обратный ток особенно сильно возрастает на втором своем участке. Для того чтобы уменьшить приток ионов от соседних дуг, вход в манжету в металлических ртутных выпрямителях преграждают так называемой деионизационной решеткой (9 на фиг. 81).

Ионы, идущие к аноду, оседают на такой решетке и нейтрализуются с имеющимися на решетке электронами. Влияние деионизационной решетки на уменьшение обратного тока видно из осциллограмм обратного тока, приведенных на фиг. 94 [Л. VIII, 11]. Осциллограмма *a* снята при манжете 2 без решетки, а осциллограмма *b* при манжете 2 с решеткой 3. Наличие решетки уменьшает, как мы видим, обратный ток и на первом пикообразном участке кривой, и особенно, на втором участке благодаря сильному уменьшению диффузионного тока.

На величину обратного тока также влияет форма и ширина манжеты. При суженных к концу манжетах обратный ток обычно меньше (осциллограмма *c*).

Таким влиянием узкого анодного рукава особенно широко пользуются в стеклянных ртутных выпрямителях высокого напряжения, где поверхности узких и длинных анодных рукавов выполняют роль решетки.



Фиг. 94. Осциллограммы обратного тока. *a*—при отсутствии решетки; *b*—при наличии ее; *c*—при суженной манжете.

Слишком большое сужение анодных рукавов в стеклянных выпрямителях или постановка слишком густых решеток в металлических выпрямителях имеет и свою отрицательную сторону. Во-первых, при этом увеличивается падение напряжения в дуге, во-вторых, при узких анодных рукавах и густых решетках мы получаем, как выше уже отмечалось, затрудненное зажигание дуги. При слишком узких рукавах мы даже можем получить такой эффект, что дуга, возникшая при малых значениях тока, при возрастании тока может прерваться, затем снова возникнуть и т. д.

Такие повторные зажигания, происходящие с большой частотой, вызывают обычно весьма большие перенапряжения в установке, так как связаны с резким изменением магнитных и электрических полей. Особенно часто такие явления можно наблюдать при холодном ртутном выпрямителе, когда плотность паров в выпрямителе недостаточна, чтобы получить концентрацию ионов в анодном рукаве, необходимую для компенсации объемного заряда.

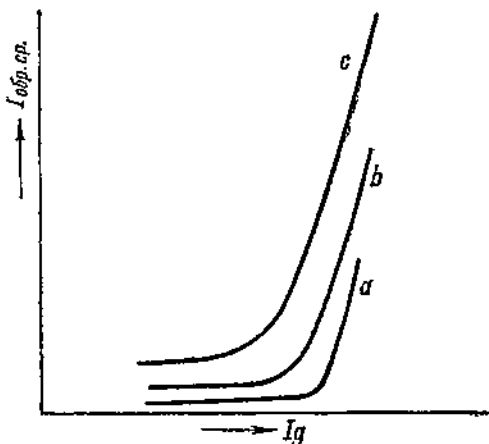
5. Перегрузка током. При перегрузке током увеличивается число ионов, являющихся продуктом распада горевшей на данном аноде дуги, а также приток ионов от горящей по соседству дуги.

Зависимость роста обратного тока от нагрузки иллюстрируют кривые фиг. 95. Из этих кривых мы видим, что после определенных значений тока нагрузки среднее значение обратного тока $I_{обр. ср.}$ растет очень быстро и может достигнуть недопустимых значений.

Геометрические размеры данного выпрямителя должны быть так рассчитаны, чтобы выпрямитель допускал известную перегрузку током без опасения появления обратных зажиганий.

Влияние перечисленных факторов, облегчающих переход от обратного тока к обратному зажиганию, будет тем больше, чем выше обратное напряжение в ртутном выпрямителе. Последнее наглядно иллюстрируется кривыми фиг. 95, характеризующими зависимость обратного тока от тока нагрузки, при трех значениях рабочего напряжения: 250 В (кривая *a*), 480 В (кривая *b*) и 600 В (кривая *c*).

Кроме прямого влияния напряжения на рост величины обратного тока рост напряжения повышает также и энергию ударяющихся об анод ионов, что непосредственно сказывается на повышении вероятности появления обратного зажигания.



Фиг. 95. Кривые обратного тока в зависимости от нагрузки при разных рабочих напряжениях, *a* — при 250 В выпрямленного напряжения; *b* — при 480 В выпрямленного напряжения; *c* — при 600 В выпрямленного напряжения.

55. Типы ртутных выпрямителей. Кривые типовой мощности

Поскольку теряемая в выпрямителе мощность определяется произведением $\Delta P_g = \Delta U_g I_g$, в котором первый множитель есть величина почти постоянная, то отсюда можно было бы заключить, что нагрузочная способность выпрямителя определяется только рабочим током,

т. е. что один и тот же выпрямитель при любых напряжениях может допускать один и тот же ток нагрузки.

В действительности такое положение имеет место только до тех пор, пока увеличение рабочего напряжения не начинает заметно сказываться на увеличении обратного тока и, следовательно, на повышении вероятности обратного зажигания (§ 54). Опытные кривые допускаемого данным выпрямителем тока в зависимости от рабочего напряжения показаны на фиг. 96. Такие кривые носят название кривых типовой нагрузки. Точка кривой (U_{gn}, I_{gn}) отвечает номинальным значением тока

Фиг. 96. Кривые допустимого тока нагрузки *a* и кривые типовой мощности *b*.

и напряжения. До номинального напряжения кривая тока идет параллельно оси абсцисс, а затем, начиная с точки, характеризуемой координатами U_{gn} и I_{gn} ход кривой примерно совпадает с гиперболой. Последнее позволяет при напряжениях, выше номинальных, определять допускаемый для данного выпрямителя ток по формуле

$$I_g = I_{gn} \frac{U_{gn}}{U_g}.$$

Номинальным напряжением для стеклянных выпрямителей считается напряжение 200—250 В. Для металлических выпрямителей за номинальное напряжение принимается — 500—600 В. Кривые *b* на фиг. 96 показывают допускаемые выпрямителем мощности при различных напряжениях.

В табл. 21 перечислены типы и указаны номинальные нагрузки стеклянных выпрямителей, производимых заводом „Светлана“ [Л. VIII, 10].

В табл. 22 приведены типы и номинальная нагрузка металлических выпрямителей, производимых заводом „Электросила“ им. Кирова [Л. VIII, 12].

При маркировке типов выпрямителей заводами-производителями принята определенная система обозначений. Так, для стеклянных выпря-

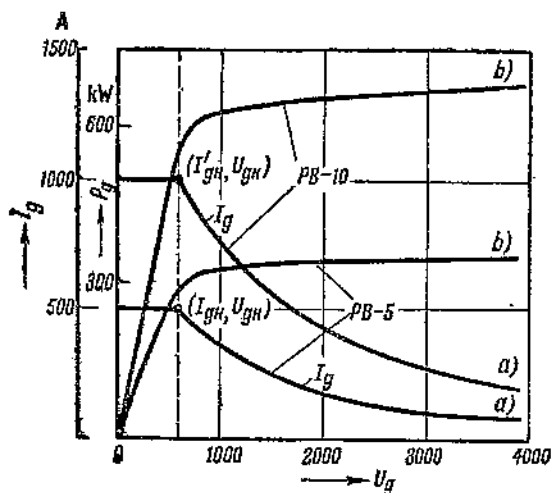


ТАБЛИЦА 21

Типы стеклянных выпрямителей завода „Светлана“

Тип	Род переменного тока	Выпрямленный ток в А	Номинальное выпрямленное напряжение в В
2В-6	} Однофазный	5	} 120—220
2ВН-12		12	
2ВН-20		20	
3ВН-30		30	
3ВН-60	} Трехфазный	60	} 220—380
3ВН-100		100	
3ВН-200		200	
2ВН-6-10000		6	
3ВН-4-3000	} Трехфазный	4	} 10 000
3ВН-6-10000		6	

мителей буква В обозначает выпрямительную колбу, стоящая за ней буква Н указывает на наличие в колбе анодов независимого возбуждения, стоящая перед буквой В цифра показывает на число рабочих анодов колбы; цифра, стоящая за буквами, обозначает максимально допускаемую величину выпрямленного тока в амперах. В обозначении для колб высокого напряжения после цифры, указывающей величину выпрямленного тока, добавляется цифра, указывающая предельную величину выпрямленного напряжения в вольтах.

При маркировке металлического ртутного выпрямителя буквы РВ обозначают ртутный выпрямитель, а стоящее за буквами число показывает допускаемую на выпрямитель нагрузку в сотнях ампер. Иногда ставится после косой черты еще цифра, показывающая число сотен вольт, на которое данный выпрямитель выполнен.

ТАБЛИЦА 22

Типы металлических выпрямителей завода „Электросила“ им. Кирова

Тип	Выпрямленный ток в А при номинальном напряжении 600 В
РВ-5	500
РВ-10	1 000
РВ-20	2 000
РВ-40	4 000
РВ-70	7 000

При выборе типа выпрямителя, удовлетворяющего данному графику нагрузки, необходимо также учитывать и те перегрузки, которые допускает данный тип выпрямителя. Завод „Электросила“ гарантирует для своих выпрямителей следующие величины перегрузок: 100%—1 мин., 50%—5 мин., 20%—15 мин.

Указанные для выпрямителей перегрузки, как показали результаты эксплуатации на ряде железнодорожных подстанций нашего Союза, могут быть заметно превышены.

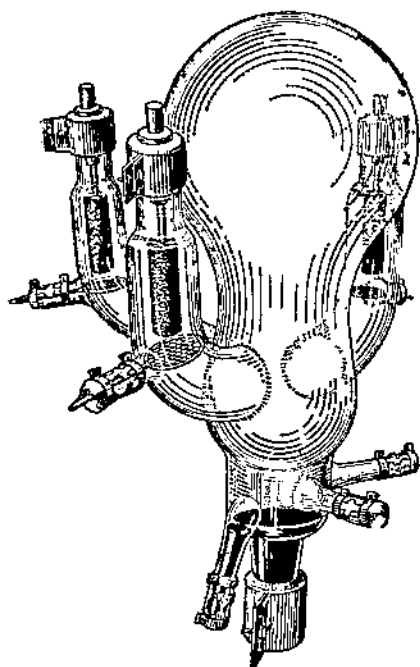
Особенно заметное повышение нагрузочной способности выпрямителей следует ожидать при нахождении достаточно эффективных мер, предупреждающих обратные зажигания при больших токах и высоких напряжениях.

ГЛАВА IX

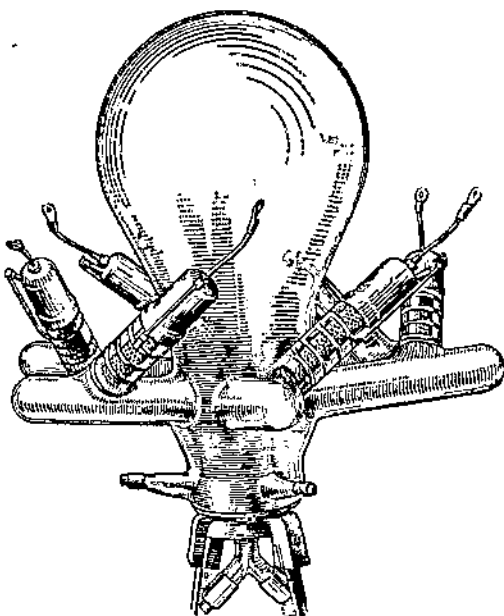
КОНСТРУКЦИЯ РТУТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

56. Стекланный ртутный выпрямитель

По внешнему виду стеклянные выпрямители различных фирм мало отличаются между собой. На фиг. 97 показан стеклянный выпрямитель



Фиг. 97. Стеклянный выпрямитель завода „Светлана“ тип ЗВН-100, на 100 А 220 В, с сетками.



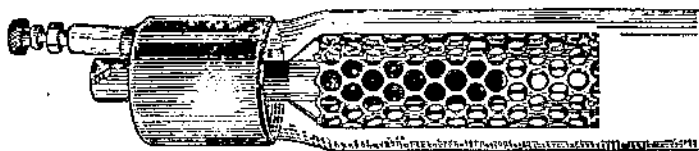
Фиг. 98. Стеклянный выпрямитель фирмы Сименс-Шуккерт.

завода „Светлана“ тип ЗВН-100 на 100 А и 220 В¹. При токах выше 100 А стеклянные выпрямители выполняются обычно с шестью рабочими анодами. Внешний вид такого выпрямителя на ток 300 А и выпрямленное

¹ Завод „Светлана“ изготовляет стеклянные выпрямители до 200 А.

напряжение — 500 V показаны на фиг. 98. Этот выпрямитель имеет сеточное управление.

Один из анодов такого выпрямителя показан отдельно на фиг. 99. Некоторые типы стеклянных колб снабжаются двумя группами рабочих анодов с целью питания одним выпрямителем нескольких рабочих цепей, имеющих различное напряжение выпрямленного тока.



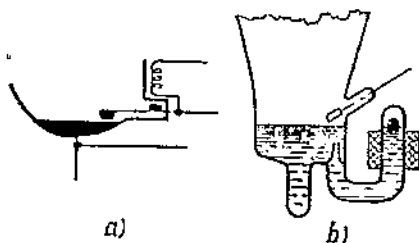
Фиг. 99. Анод стеклянного выпрямителя с сеткой.

Аноды возбуждения располагаются, как правило, ниже рабочих анодов. Анод зажигания располагается обычно рядом с катодом. В мощных колбах анод зажигания часто выполняют также по одному из вариантов, представленных на фиг. 100. В варианте *a* временный контакт анода зажигания с ртутью достигается путем упругого подвеса металлического анода над ртутью и магнитного воздействия на держатель анода посредством соленоида, установленного вне стеклянного корпуса. В варианте *b* катод имеет вспомогательный резервуар, ртуть из которого вытесняется поплавком, заполненным железными опилками. При воздействии на поплавок магнитным полем соленоида ртуть фонтаном брызжет на анод зажигания, образуя токопроводящий мостик.

Для соединения электродов с наружными токопроводящими частями служат металлические вводы, проходящие через стекло. Конструкции этих вводов уделяется особое внимание, так как от герметичности впаев и их механических и электрических свойств зависит надежность работы колбы.

Одним из основных требований при конструировании ввода является подбор одинакового коэффициента температурного расширения стекла колбы и металла вводов. Раньше колбы изготовлялись из мягкого свинцового стекла, в качестве вводов служила платина или ее суррогаты. В настоящее время колбы стеклянных ртутных выпрямителей изготавливаются почти исключительно из так называемого молибденового стекла, температурный коэффициент расширения которого весьма близок к коэффициенту расширения молибдена. Все вводы в такую колбу делаются почти исключительно из молибдена.

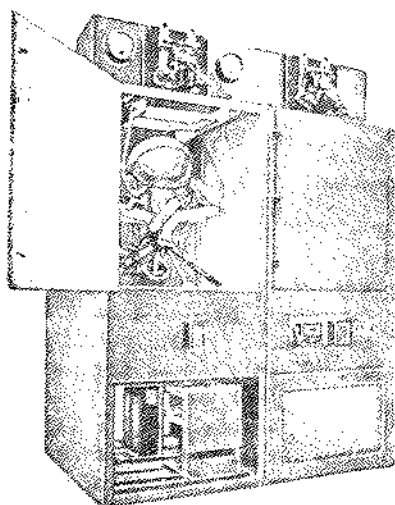
Для механической прочности и внешней отделки все выводы из колбы снабжаются латунированными никелированными цоколями, прочно



Фиг. 100. Новые способы зажигания дуги в стеклянных выпрямителях. *a* — магнитное воздействие на упругую пластинку; *b* — магнитное воздействие на поплавок.

укрепленными на стеклянных отрезках; на эти цоколи надеваются хомуты (кольца) с гибкими проводами, снабженными соответствующими наконечниками или зажимами.

Для защиты выпрямителя от механических повреждений и для предохранения обслуживающего персонала от светового воздействия



Фиг. 101. Установка с стеклянным ртутным выпрямителем.

ртутной дуги стеклянные выпрямители монтируются вместе с деталями электромагнитной схемы в закрытых шкафах; на их лицевую сторону выводится вся управляющая и измерительная аппаратура. Фотография одного из таких шкафов показана на фиг. 101.

При обдувании выпрямителя вентилятором стенки шкафа служат также в качестве направляющих для воздуха.

57. Металлический ртутный выпрямитель

На фиг. 102 показан разрез современного металлического ртутного выпрямителя завода „Электросила“ типа РВ-20. Основные конструктивные детали, из которых состоит металлический ртутный выпрямитель, могут быть разбиты на следующие группы (конструктивные узлы): 1) вакуумный корпус,

2) рабочие аноды выпрямителя, 3) катод выпрямителя, 4) и 5) система возбуждения и зажигания, 6) водяная рубашка выпрямителя, нижняя часть которой (цоколь) служит одновременно подставкой для выпрямителя, 7) система охлаждения выпрямителя, 8) вакуумная система выпрямителя, включающая в себе и приборы, служащие для измерения вакуума, наконец, 9) уплотнения, служащие для герметичности мест соединения отдельных деталей.

Описание конструкции мы будем вести в соответствии с приведенным разделением, выделяя, однако, рассмотрение группы пп. 7 и 8 в отдельную главу.

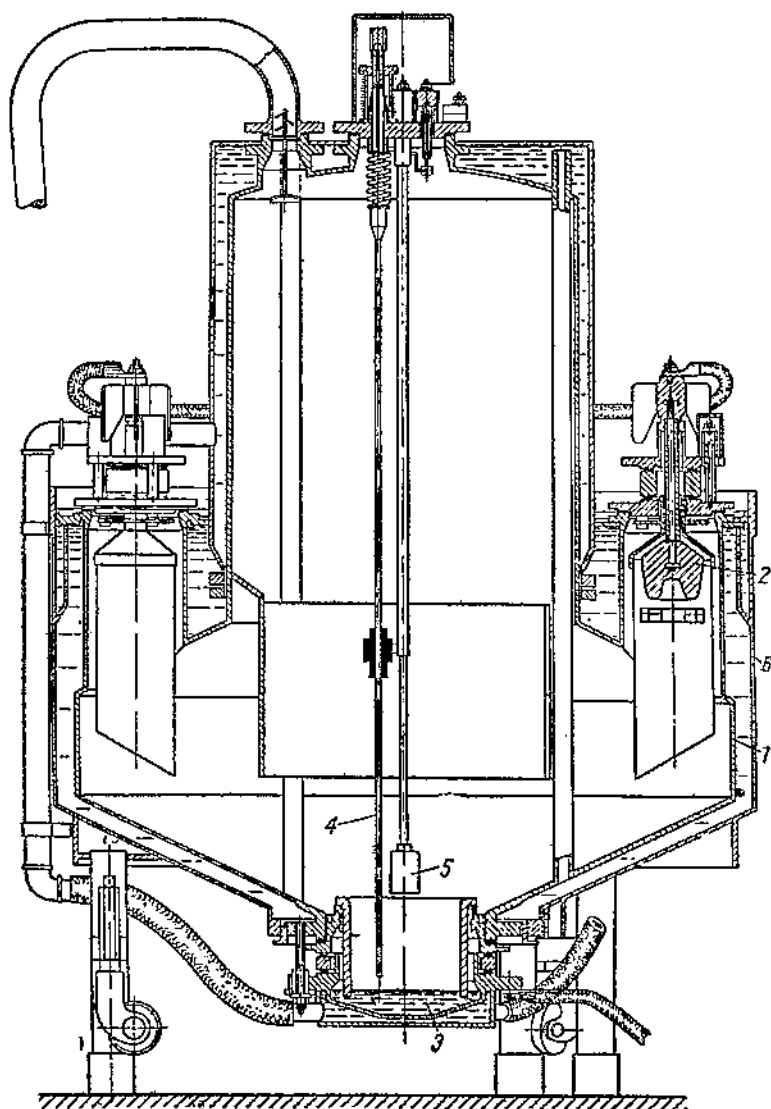
а) Уплотнения. Выпрямители собираются из отдельных частей, которые не могут быть связаны в одно металлическое целое путем спайки или сварки из-за необходимости изоляции электродов от корпуса выпрямителя, а также из-за необходимости внутренних осмотров выпрямителя в период его эксплуатации. Высокая газонепроницаемость мест стыка связываемых деталей является одним из наиболее существенных требований, предъявляемых к выпрямителю.

Поэтому особенное внимание фирмы, изготовляющие выпрямители, обращают на качество и надежную работу уплотнений в местах соединений.

Применяемые типы уплотнений весьма разнообразны.

На фиг. 103,а показано резиновое уплотнение, применяемое заводом „Электросила“ и германской фирмой Сименс. Уплотняющим телом

является здесь специальный сорт резины. Резиновая шайба 2 закладывается между уплотняемыми поверхностями и сжимается натяжными

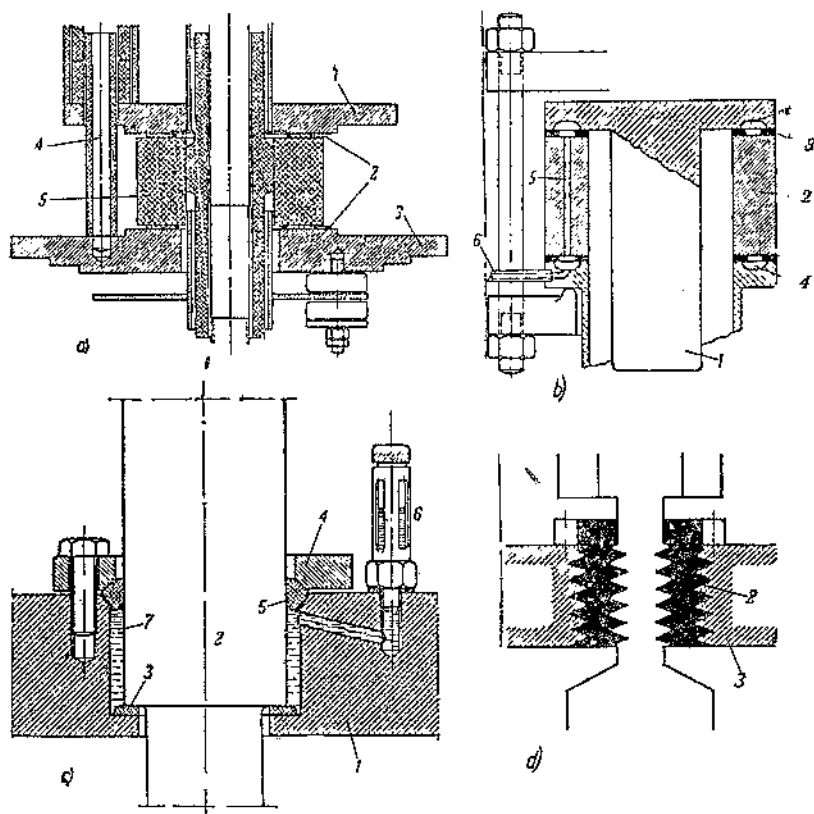


Фиг. 102. Разрез металлического выпрямителя типа РВ-20 завода „Электросила“.

1 — корпус РВ; 2 — главные аноды; 3 — ртутный катод; 4 — анод зажигания; 5 — аноды возбуждения; 6 — водяная рубашка.

болтами 4. Соответствующим нажимом болтов достигается требуемая плотность шва.

В показанном на фиг. 103, *а* уплотнении резиновые шайбы уплотняют швы между изолятором анода 5 и двумя его фланцами — нижним 3 и верхним 1. Для предупреждения выделения резиной, соприкасающейся с вакуумом, газов резиновые шайбы со стороны внутренней кромки снабжаются металлическими (обычно железными) обжимами.



Фиг. 103. Типы уплотнений.

а — резиновое уплотнение: 1 — верхний фланец анода; 2 — резиновая прокладка; 3 — нижний фланец анода; 4 — скрепляющий изолированный болт; 5 — изолятор. *б* — свинцово-алюминиевое уплотнение: 1 — анодный стержень; 2 — изолятор; 3 — свинцовая шайба; 4 — промежуточная выточка; 5 — изолятор с каналом; 6 — вакуумная трубка. *в* — ртутное асбестовое уплотнение: 1 — верхняя крышка выпрямителя; 2 — анодный стержень; 3 — асбест; 4 — верхний фланец; 5 — резиновое кольцо; 6 — контрольный указатель; 7 — ртуть. *г* — micaевое уплотнение: 1 — стержень анода; 2 — mica; 3 — фланец анода.

Достоинство резиновых уплотнений заключается в простоте их изготовления и сборки, недостатком — необходимость избегать перегрева резины сверх $50-60^{\circ}\text{C}$, так как при более высокой температуре резина теряет газонепроницаемость и начинает сама интенсивно выде-

лять газы, что крайне вредно отражается на работе выпрямителя и создает угрозу обратного зажигания.

Фирма АЕГ делает уплотняемый шов двухступенчатым (фиг. 103, *b*), пользуясь в качестве уплотнения свинцовой шайбой 3. Внутренняя полость шва 4 соединяется при помощи трубочки 6 с вакуумным баком. При этих условиях между наружным воздухом и пространством внутри выпрямителя создается двойной перепад давлений, что обеспечивает меньшее натекание воздуха в выпрямитель. Это уплотнение работает хорошо и при высоких температурах, но его сборка сложна. Другим недостатком такого уплотнения является наличие разветвленной системы вакуумных трубок, соединяющих отдельные уплотненные места с вакуумной системой.

Фирма Броун-Бовери применяет ртутно-асбестовые уплотнения, а в последнее время для некоторых швов и резиновые уплотнения. Конструкция ртутно-асбестового уплотнения показана схематически на фиг. 103, *c*.

Как видно из этого рисунка, в одной из двух деталей выпрямителя, шов между которыми должен быть уплотнен, делается фигурная выточка. На дно этой выточки забивается асбест 3. Пространство над асбестом заливается ртутью 7, что и создает нужную герметичность, так как через асбест ртуть не проходит. Для контроля за состоянием шва ртуть выведена через боковой канал в контрольную стеклянную трубочку 6. Устойчивый уровень ртути в трубке по указанию фирмы является показателем исправного состояния, и потому контроль за уплотнениями возможен в отношении каждого отдельного шва¹. Данный тип уплотнений меньше боится температурных изменений, но к недостаткам его надо отнести известную сложность сборки и возможность при более высоких температурах шва выхода из уплотнений ртутных паров, вредно действующих на человеческий организм.

Одним из новейших типов уплотнений является уплотнение, применяемое в последнее время американскими фирмами Вестингауз и Дженераль Электрик. Это уплотнение, получившее название микалексового, схематически показано на фиг. 103, *d*.

Микалекс представляет собой подвергнушуюся термической обработке смесь из измельченной слюды и борноокислого свинца. Будучи изолятором, микалекс одновременно обладает тем свойством, что спрессованный под большим давлением с металлом весьма прочно с ним связывается.

Таким образом микалекс представляет собой одновременно и изолятор и уплотнение, а это позволяет по-новому подойти к вопросу о конструкции выпрямителя.

Применяя микалексовое уплотнение для тех швов, где требуется изоляция, и металлическую пайку для разъемных неизолируемых швов, можно получить выпрямительный сосуд, который допускает демонтаж

¹ В действительности уровень ртути в контрольной трубке указывает лишь то, что в уплотнении не образовалось отверстий, доступных для выхода ртути из уплотнений. Это еще не является полной гарантией газонепроницаемости шва, так как воздух может пройти через значительно меньшие отверстия, в частности, через пространство, образованное между ртутными стенками и стенками, соприкасающимися с ртутью.

в случае каких-либо внутренних нарушений или при необходимости внутренних контрольных осмотров и в то же время не нуждается в постоянной работе вакуумных насосов.

б) Вакуумный корпус. Форма вакуумного корпуса металлического выпрямителя, вначале близко подходившая к форме стеклянного выпрямителя, приняла в настоящее время у разных фирм, изготавливающих ртутные выпрямители, несколько различные очертания.

Типичные формы вакуумных корпусов металлического ртутного выпрямителя показаны на фиг. 104.

Вакуумный корпус, показанный на фиг. 104, *а*, принадлежит выпрямителю завода „Электросила“.

Завод „Электросила“ изготавливает корпус выпрямителя из листовой стали. Отдельные части корпуса свариваются между собой. Сварка в связи с необходимостью обеспечить высокую газонепроницаемость

сосуда должна быть особенно тщательной. К корпусу в местах крепления анодов и катода привариваются фланцы, к которым крепятся электроды. Аноды выпрямителя располагаются по окружности на верхней части корпуса в коротких анодных рукавах. Число анодов в зависимости от мощности выпрямителя изменяется в пределах от 6 до 24.

Преимуществом корпуса выпрямителя „Электросила“ явля-

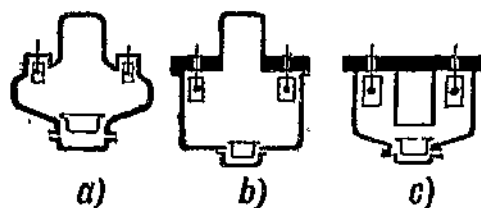
ется относительно малый удельный объем его, малые размеры уплотнений и, наконец, удобная форма для обтекания корпуса охлаждающей водой. Недостатком является плохая доступность для осмотра и ревизии внутренних частей корпуса. Внутренний осмотр приходится производить через отверстие катода, для чего необходимо предварительно его снимать.

На фиг. 104, *б* дан разрез корпуса выпрямителя Броун-Бовери. Здесь все аноды монтируются на массивной плите. Эта плита привинчивается к корпусу и может быть в случае необходимости снята вместе с смонтированными на ней деталями. В этом преимущество данного типа корпуса; его недостаток — в наличии большого уплотнения по окружности крышки. Кроме того, необходимо учесть, что для подъема тяжелой крышки (1 ÷ 1,5 т) требуется соответствующий подъемный кран.

Корпус выпрямителя фирмы Сименс изображен на фиг. 104, *с*. Он выполняется разъемным, так же как и корпус у фирмы Броун-Бовери, но конденсационный цилиндр располагается не вне, а внутри корпуса. Этим достигается наибольшая экономия в объеме.

Американские фирмы, выполняя свои выпрямители преимущественно по типу Сименса, вводят еще для более мощных единиц охлаждающий змеевик в конденсационный цилиндр.

Размеры вакуумного корпуса определяются размером и количеством анодов, а также мощностью выпрямителя.



Фиг. 104. Форма корпусов металлического ртутного выпрямителя. *а*—корпус выпрямителя завода „Электросила“; *б*—корпус выпрямителя завода Броун-Бовери; *с*—корпус выпрямителя завода Сименс.

с) Рабочие аноды. Анод является одной из наиболее ответственных деталей выпрямителя. Правильной конструкцией анода предопределяется в значительной мере надежность работы выпрямителя, в частности, малая вероятность обратных зажигания.

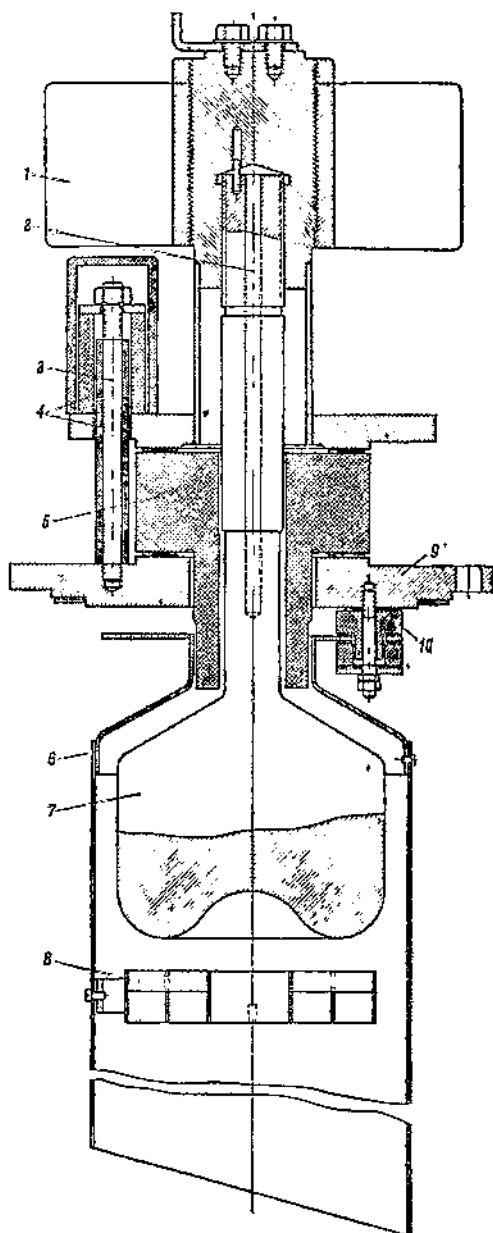
Анод как конструктивный узел включает в себя обычно следующий комплекс деталей (фиг. 105):

1. Головка анода 7 выполняется из железа или графита. Размер головки определяет величину рабочего тока и ее температурный режим.

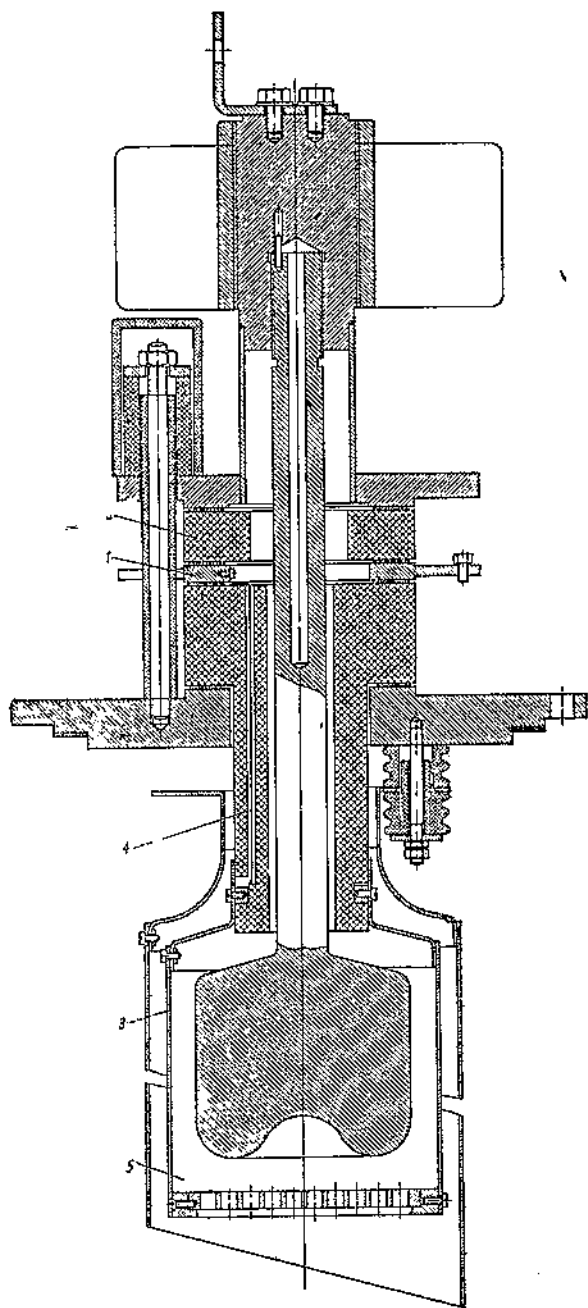
Материал головки анода должен быть, по возможности, свободным от механических и химических примесей. Кроме того, материал должен хорошо обезгаживаться и не распыляться при тех температурах ($500 \div 700^\circ \text{C}$), которые являются наиболее благоприятными для нормальной работы выпрямителя.

2. Стержень анода 2 является проводником тока от головки анода к наружному токопроводящему зажиму. Одновременно стержень является проводником части тепла, получаемого головкой анода, к наружному радиатору анода. Анодный стержень делается или из железа, составляя с головкой анода цельноточеное тело, или же из меди. Медный стержень соединяется резьбой с головкой анода и закрывается по всей длине железной трубкой-чехлом во избежание вредного действия ртутных паров на медь.

3. Анодная манжета 6. Ее функции — защитить анод от непосредственного действия



Фиг. 105. Конструкция анода А-28 к выпрямителям завода „Электросила“. 1 — радиатор анода; 2 — анодный стержень; 3 — изолированный болт, скрепляющий нижний и верхний фланцы; 4 — бакелитовые втулки; 5 — изолятор; 6 — манжета; 7 — головка анода; 8 — деионизационная решетка; 9 — нижний фланец; 10 — изолятор манжеты.



Фиг. 106. Конструкция анода с управляемой сеткой. 1 — сеточный фланец; 2 — сеточный изолятор; 3 — держатель сетки; 4 — проводник между сеточным фланцем и держателем сетки; 5 — сетка.

ртутных паров, идущих от катода, и от капель ртутного конденсата, падающих сверху, и, наконец, от ионных потоков, направляющихся от горящих по соседству дуг к данному аноду в тот период, когда он отрицателен. Анодная манжета сокращает также период деионизации для ионов, оставшихся после горячей дуги. Крепится манжета к нижнему фланцу анода (9) на изоляторах (10).

4. Деионизационная решетка 8 служит для ограничения доступа ионов к аноду, поскольку анодная манжета снизу открыта. Кроме того, решетка способствует равномерному распределению тока по сечению манжеты. Решетка обычно изолируется от манжеты. Конструкция решеток и их расстояние от анода у разных фирм различны.

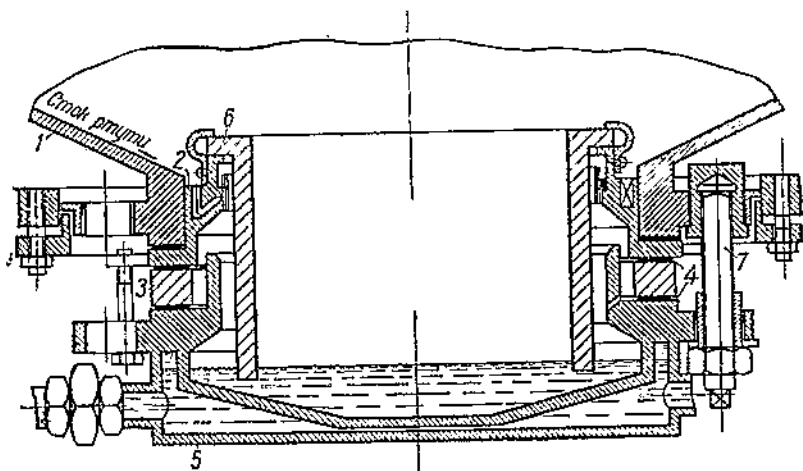
5. Анодный изолятор 5. Сложной формы изолятор анода, показанный на фиг. 105, выполняет одновременно две функции: изолирует анод от корпуса и, кроме того, защищает анодный стержень от непосредственного попадания на него потока электронов. Последнее важно с точки зрения предупреждения обратных зажигания. При установке изолятора должен быть сохранен зазор между изолятором и горячими местами металла

для предупреждения появления мест с пониженной работой выхода электронов (из-за соединения силиката с металлом).

При наличии таких мест вероятность появления обратных зажигания, как выше указывалось, сильно возрастает.

6. Анодный радиатор 1. Для предупреждения перегрева анодных уплотнений на конце, выходящем наружу, анод снабжается радиатором.

Анодные радиаторы, которыми снабжаются анодные стержни, могут быть двух типов: водяные, показанные на фиг. 110, или же воздушные, показанные на фиг. 109. Водяные радиаторы, применяемые для некоторых более мощных типов выпрямителей только фирмой Броун-Бовери, работают по принципу термосифона, в котором вода, нагретая теплом



Фиг. 107. Конструкция катода выпрямителя завода „Электросила“ РВ-20. 1 — корпус выпрямителя; 2 — крепительное кольцо; 3 — фарфоровое кольцо; 4 — уплотнение; 5 — донница катода; 6 — шамотовый щиток; 7 — стяжная шпилька.

от стержня, поднимается вверх и затем, охладившись, вновь подходит к нижней части анодного стержня.

Анод управляемого сеткой ртутного выпрямителя имеет, как это можно видеть из фиг. 106, более сложную конструкцию в связи с необходимостью не только изолировать управляющую разрядом сетку 5, но и осуществить изолированный подвод тока к ней. Сеточный ввод в конструкции, представленной на фиг. 106, состоит из наружного сеточного фланца 1 (изоляция которого потребовала введения добавочного изолятора 2), сеткодержателя 3 и проводника 4, соединяющего сеточный фланец с сеткодержателем.

д) Катод. Основной частью в конструкции катода (фиг. 107) является металлическая чашка, или донница, 5, куда наливается ртуть, собственно и являющаяся катодом выпрямителя. При работе выпрямителя благодаря нагреву катода и ничтожно малому давлению газов в сосуде

ртуть сильно испаряется, причем это испарение происходит в гораздо больших размерах, чем это требуется для нормальной работы.

Для уменьшения количества испаряющейся ртути катод выпрямителя нужно непрерывно охлаждать. Для охлаждения катода применяется проточная вода, которая пропускается через двойное дно катода.

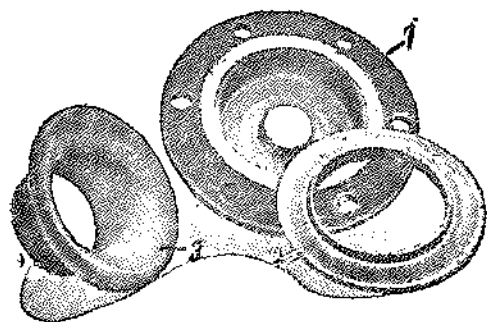
Другими деталями катода являются:

- 1) фарфоровое кольцо 3 с двумя резиновыми уплотнениями 4;
- 2) изоляционный цилиндр 6, подвешенный на промежуточном кольце 2.

Обе эти детали служат для изоляции катода от корпуса выпрямителя.

Хотя разность потенциалов между корпусом и катодом крайне невелика (не превосходит величины порядка 20—25 В), тем не менее,

вопросу надлежащей изоляции катода от корпуса приходится уделить достаточное внимание. Изоляционный цилиндр 6, будучи укреплен на промежуточном кольце и уходя своим нижним концом в ртуть, предупреждает возможность переброса основания дуги с катода на корпус. Во избежание образования проводящих мостиков от стенок корпуса к катоду при стекании конденсирующейся ртути в кольцевой выточке промежуточного кольца высверлены отверстия. Через них ртуть стекает отдельными каплями к катоду с наружной стороны



Фиг. 108. Основные детали катода металлического ртутного выпрямителя РВ-5. 1 — донышко катода; 2 — резиновое уплотнение; 3 — шамотовый цилиндр.

роны изолирующего цилиндра. Сток отдельными каплями имеет еще то преимущество, что при этом ртуть фильтруется.

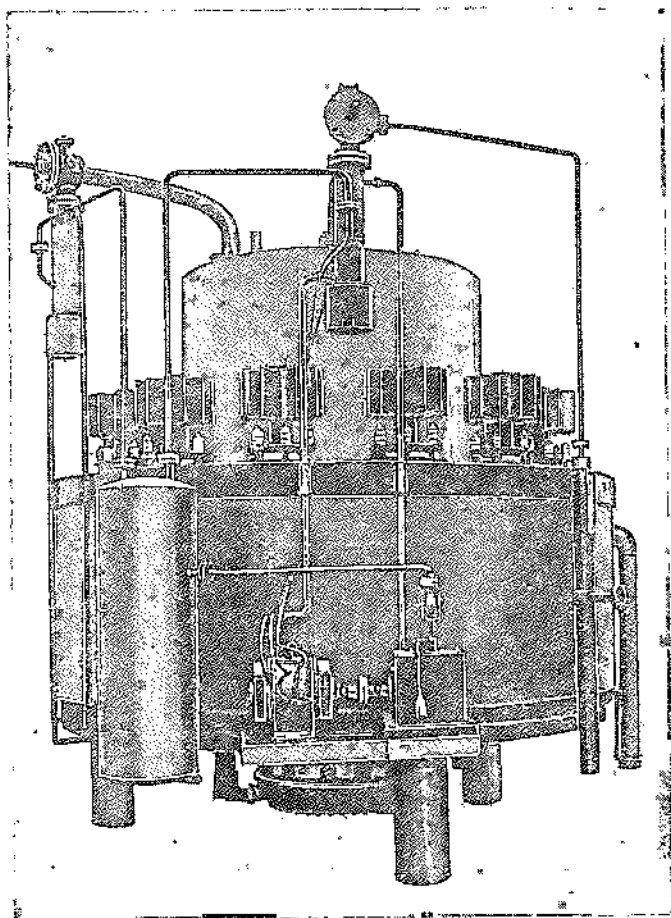
На фиг. 108 показана фотография отдельных частей катода — выпрямителя РВ-5: катодная чашка, резиновое уплотнение и изоляционный цилиндр.

Минимально необходимое количество ртути для катода может быть теоретически определено по тому, сколько испаряется ртути при максимальной нагрузке. Практически разные фирмы берут разное количество ртути. Так, например, фирма Броун-Бовери определяет количество потребной ртути в пределах от 1 до 1,5 кг на каждые 100 А выпрямленного тока; американские фирмы берут в пределах от 2,5 до 5 кг на каждые 100 А выпрямленного тока. Количество ртути в выпрямителях завода „Электросила“ указано в табл. 23 [Л. VIII, 12].

е) Система зажигания и возбуждения. Будучи построены на небольшой ток и более низкое напряжение, аноды возбуждения по размерам меньше главных и располагаются ближе к катоду (фиг. 102). Так же как и главные аноды, аноды возбуждения 5 защищены металлическими манжетами. Монтируются аноды возбуждения или на крышке выпрямителя рядом с главными анодами или же, как на фиг. 102,

на отдельном фланце, на верхней части конденсационного цилиндра. Вводы к этим анодам также изолированы от корпуса и имеют такие же уплотнения, как и вводы главных анодов.

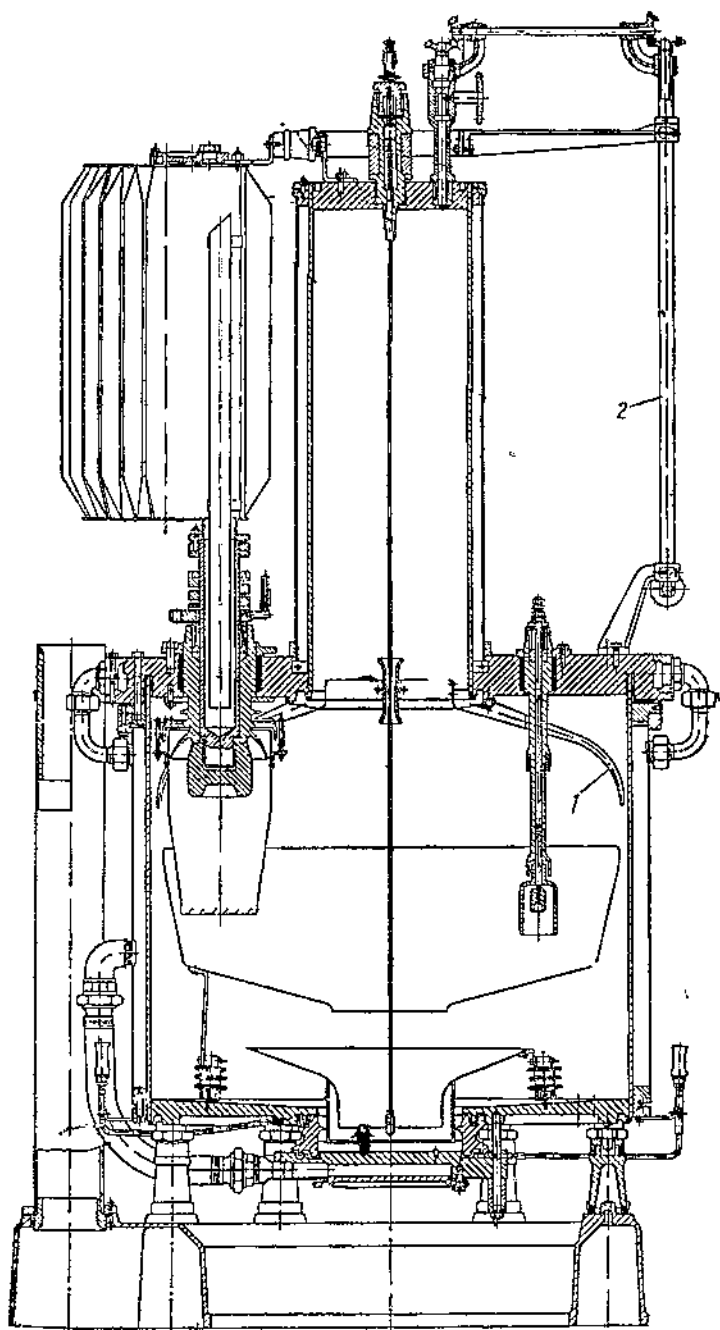
Анод зажигания 4 располагается еще ближе к ртути, на расстоянии нескольких сантиметров от нее, и подвешивается на длинном стержне



Фиг. 109. Выпрямитель РВ-20 завода „Электросила“.

к электромагнитному механизму, расположенному на верхней крышке конденсационного цилиндра. Наконечник анода зажигания обычно делается из вольфрама с тем, чтобы высокая температура дуги зажигания не вызывала его расплавления.

Электромагнитный механизм анода зажигания выносится на крышку конденсационного цилиндра. При этом трубка, в которой расположены пружины, поддерживающие сердечник электромагнита в верхнем поло-

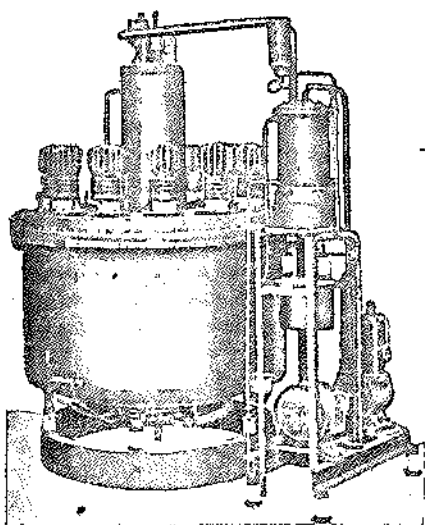


Фиг. 110. Разрез металлического ртутного выпрямителя фирмы Броун-Бовери. 1 — желоб для стекания ртути; 2 — привод к вакуумному крану.

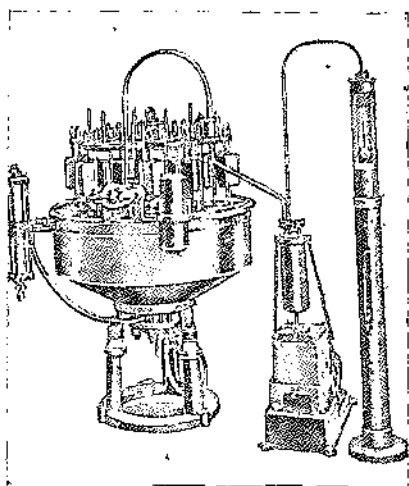
ТАБЛИЦА 23

Тип выпрямителя		PB-5	PB-10	PB-20
Количество ртути . . .	$\left\{ \begin{array}{l} \text{в см}^3 \\ \text{в kg/100A} \end{array} \right.$	1 000 2,7	1 000—1 200 1,36—1,63	2 000—2 200 1,36—1,5

жения, и сам сердечник располагаются в вакууме, а соленоид, приводящий в движение сердечник, расположен в атмосфере. Такой конструкцией обеспечивается хорошая газонепроницаемость уплотняющего ввода и надежное действие подвижной части анода зажигания.



Фиг. 111. Наружный вид выпрямителя фирмы Броун-Бовери.



Фиг. 112. Наружный вид выпрямителя фирмы АЕГ.

г) Водяная рубашка выпрямителя. Так как металлический ртутный выпрямитель нуждается в непрерывно действующем водяном охлаждении, то весь вакуумный корпус выпрямителя погружается в водяную рубашку. Конденсационный цилиндр имеет отдельную водяную рубашку. Этим достигается возможность создать определенную последовательность охлаждения отдельных частей выпрямителя (§ 74). Во избежание разъедания водяной рубашки и корпуса электролизом внутренняя поверхность водяной рубашки прокрашивается суриком, а наружная поверхность вакуумного корпуса покрывается посредством пульверизатора тонким слоем цинка. Нижняя часть водяной рубашки переходит в цоколь, служащий подставкой для выпрямителя. Цоколь устанавли-

вливается на изоляторах, так как корпус выпрямителя должен быть изолирован от земли.

Фотография наружного вида выпрямителя типа РВ-20, изготовляемого заводом „Электросила“, показана на фиг. 109.

58. Выпрямители иностранных фирм

Ряд² характерных особенностей выпрямителей иностранных фирм был нами отмечен уже ранее при общем описании конструкции выпрямителя. Здесь мы отметим еще некоторые из конструктивных особенностей этих выпрямителей.

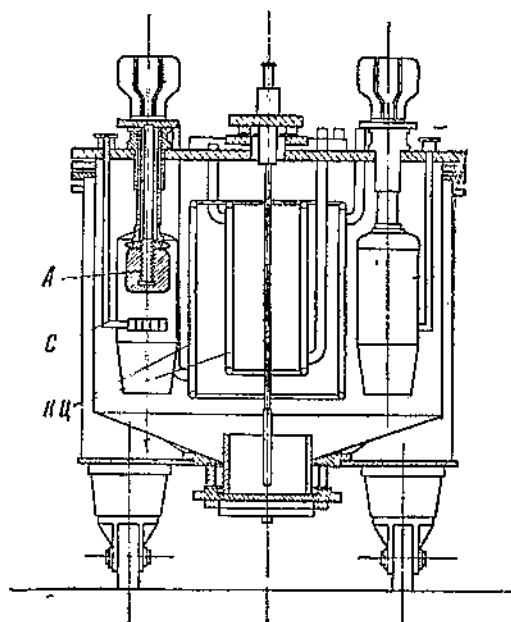
На фиг. 110 дан продольный разрез выпрямителя Броун-Бовери. Основной особенностью данного типа выпрямителя является наличие в нем верхней стальной съемной крышки, на которой монтируются все аноды, а также и конденсационный цилиндр. Анод зажигания с втягивающим соленоидом помещен на крышке конденсационной камеры, укрепленной на верхней стальной плите выпрямителя.

Другой особенностью устройства выпрямителя Броун-Бовери является наличие внутреннего воронкообразного сосуда. Последний применяется в качестве добавочной защиты от перескакивания дуги на корпус

выпрямителя и одновременно служит в качестве направляющего цилиндра для струй ртутного пара, идущих от катода к конденсационному цилиндру. Чтобы конденсирующаяся ртуть не стекала по стенкам данной воронки, под конденсационным цилиндром, как видно из фиг. 110, прикреплен металлический навес *I*, направляющий струю конденсата непосредственно по стенке выпрямителя.

Большие радиаторы, заполненные водой и работающие по принципу термосифона, показывают, что на фигуре изображен многоамперный выпрямитель. Снизу справа на фиг. 110 виден один из ртутных указателей состояния шва у катода.

Справа у конденсационного цилиндра на фиг. 110 видна штанга *2*, служащая для управления посредством зубчатой передачи вакуумным краном. Последний расположен на крышке конденсационного ци-



Фиг. 113. Разрез выпрямителя фирмы Инглиш Электрик Компани: *A*—анод; *C*—сетка; *K.C.*—конденсационный цилиндр.

линдра. Наружный вид выпрямителя фирмы Броун-Бовери показан на фиг. 111.

Представленный на данном рисунке выпрямитель имеет анодные радиаторы — воздушные небольших размеров. Это показывает, что выпрямитель — малоамперный. Слева от выпрямителя расположена вакуумная система его.

На фиг. 112 дан наружный вид выпрямителя фирмы АЕГ последних выпусков. Существенной особенностью данного выпрямителя является отсутствие в нем специального конденсационного цилиндра, ртутные пары в нем конденсируются непосредственно на стенках корпуса. Аноды у выпрямителя АЕГ, как и у выпрямителей завода „Электросила“, устанавливаются на отдельных фланцах. Для предупреждения механических напряжений фарфора анодных вводов при изменениях температуры, обычно сопровождающих работу выпрямителей, крепление верхнего фланца анода производится через демпфирующие пружины.

На фиг. 113 показан разрез выпрямителя английской фирмы English Electric, изготовляющей свои выпрямители по типам выпрямителей фирмы Сименс в Германии. Конденсационный цилиндр в данном типе выпрямителя находится внутри выпрямительного сосуда и выполнен в виде двух коаксиальных цилиндров, что ведет к уменьшению объема, занимаемого конденсационной поверхностью.

ГЛАВА X

ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА РТУТНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

59. Расчет анодной манжеты металлического ртутного выпрямителя

При расчете любой машины один из ее основных элементов принимается в процессе расчета за исходный. Размеры этого элемента, рассчитанные по требующейся нагрузочной способности машины, влияют затем на определение размеров других элементов машины. Для металлических ртутных выпрямителей в качестве такого исходного элемента может быть принята анодная манжета и самый анод [Л. VIII, 14].

Размеры анода должны, с одной стороны, обеспечивать минимальное анодное падение напряжения, а с другой — нормальную температуру, которая у металлических выпрямителей должна лежать в пределах от 500 до 700° С. Минимальное падение напряжения у анода мы получаем, как известно, тогда, когда анод имеет максимально возможные размеры, т. е. тогда, когда диаметр анода возможно ближе подходит к диаметру манжеты. Поэтому размеры анода легко определить, если известен диаметр анодной манжеты.

Диаметр манжеты D при заданном токе анода I_a определяется в свою очередь допускаемой плотностью направленного электронного тока $j_{н.э}$, поскольку плотностью ионного тока (равного примерно $1/400$ от плотности электронного тока) мы можем пренебречь.

В этом случае

$$I_a = j_{n,e} \frac{\pi D^2}{4},$$

откуда

$$D = \sqrt{\frac{4 I_a}{\pi j_{n,e}}}. \quad (X, 1)$$

Теоретически вполне обоснованных данных для выбора величины $j_{n,e}$ в настоящее время еще не имеется, но известным критерием для выбора этой величины может служить предельная процентная величина ионов в единице объема по отношению к общему числу молекул, содержащихся в том же объеме. Опыты, проведенные Хэллом [Л. VI, 2], показали, что если плотность тока в ртутных парах начинает превышать определенные значения (зависящие от диаметра и длины отверстия для дуги), то дуга начинает работать крайне неустойчиво. Если по данной плотности тока подсчитать плотность ионов, содержащихся в 1 см^3 , и принять во внимание плотность ртутного пара, соответствующего проводимым опытам, то оказывается, что дуга делается неустойчивой, если процент ионизированных молекул превышает 20—25% по отношению к общему числу молекул, содержащихся в рассматриваемом объеме [Л. VIII, 13].

При превышении указанного процента ионизации вследствие сильного уменьшения встреч электронов с оставшимися еще нейтральными атомами в дуге появляются нескомпенсированные участки с объемным отрицательным зарядом и как следствие этого перераспределение потенциалов, приводящие к неустойчивости дуги и даже обрыву ее. Последнее обычно связано с большими перенапряжениями, угрожающими целостности изоляции установки и соединительной проводки вследствие мгновенного освобождения значительных запасов магнитной энергии, запасенной в индуктивностях выпрямительной цепи.

Режим нормальной работы должен лежать в пределах, заметно удаленных от данного предельного состояния нагрузочного режима. Опыт показывает, что дуга работает вполне устойчиво, если процент ионизированных молекул не превышает 5—6 [Л. VIII, 13].

Определяя этот процент ионизаций для общности через f , а число молекул пара в 1 см^3 через n , мы можем записать, что допускаемая плотность ионов (или электронов) при нормальном режиме должна быть не выше, чем!

$$n_e = n_i = f n. \quad (X, 2)$$

Плотность молекул n , содержащихся в 1 см^3 при заданной температуре T и давлении p , мы можем определить по формуле

$$n = n_0 \frac{T_0}{p_0} \frac{p}{T}, \quad (X, 3)$$

где $n_0 = 2,67 \cdot 10^{18}$ есть число молекул в 1 см^3 при нормальных условиях: при давлении ртутного столба $p_0 = 760 \text{ мм Hg}$ и температуре $T_0 = 273^\circ \text{ K}$ (0°C). Подставляя значение n_e из (X, 2) в (VI, 4), мы

получаем значение допускаемой плотности беспорядочного электронного тока

$$j_e = 2,48 \cdot 10^{-14} f n T_e^{1/2}. \quad (X, 4)$$

Плотность направленного электронного тока $j_{н.в}$ определяем по найденному значению j_e для заданной температуры электронов T_e по кривой фиг. 37.

Пример [Л. VIII, 13]. Определить размер манжеты в выпрямителе РВ-40, рассчитанном на нагрузку в 4000 А, если электрической схемой обеспечивается одновременная работа четырех анодов из 12 имеющихся и если работа выпрямителя нормально протекает при температуре корпуса 40° С. Определить также градиент потенциала в дуге такого выпрямителя при найденных размерах манжеты.

Принимая температуру конденсации паров ртути равной температуре корпуса, мы по кривой фиг. 33 находим $p = 6 \mu \text{ Hg}$.

Температуру молекул в парах дуги T мы принимаем по температуре анода, которая при работе выпрямителя примерно равна 1000° К.

В этом случае нормальная концентрация молекул в пространстве, окруженном манжетой, определится по формуле (X, 3)

$$n = \frac{2,67 \cdot 10^{19} \cdot 273 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{760 \cdot 1000} = 5,76 \cdot 10^{13} \text{ молекул на } 1 \text{ см}^3.$$

Далее оцениваем долю ионизированных молекул при нормальной нагрузке величины $f = 3,5\%$, учитывая требования в отношении перегрузок и возможность снижения температуры выпрямителя.

Тогда по (X, 2) мы получаем допускаемую плотность электронов

$$n_e = 0,035 \cdot 5,76 \cdot 10^{13} = 20,2 \cdot 10^{11} \text{ электронов на } 1 \text{ см}^3.$$

Для давления $p = 6 \mu \text{ Hg}$ кривая фиг. 36 дает температуру электронов

$$T_e = 20\,000^\circ \text{ K}.$$

Плотность электронного беспорядочного тока определится по формуле (X, 4)

$$j_e = 2,48 \cdot 10^{-14} \cdot 20\,000^{1/2} \cdot 20,2 \cdot 10^{11} = 7,07 \text{ A/cm}^2.$$

Получая, далее, из кривой фиг. 37 отношение $\frac{j_e}{j_{н.в}} = 4$, мы находим допускаемую плотность электронного тока

$$j_{н.в} = \frac{7,07}{4} = 1,76 \text{ A/cm}^2.$$

Приняв, далее, во внимание, что ток I_g распределяется между четырьмя одновременно работающими анодами, мы можем, пользуясь формулой (X,1), определить диаметр манжеты

$$D = \sqrt{\frac{4I_a}{\pi j_{к.с}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4000}{4 \cdot 3,14 \cdot 1,76}} \approx 27,5 \text{ см.}$$

Градиент потенциала в такой манжете будет согласно формуле (VIII, 2)

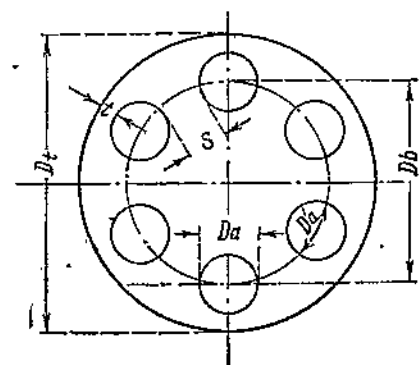
$$E = \frac{1,08}{27,5} = 0,04 \text{ В/см.}$$

Стремясь к минимальной величине анодного падения напряжения, мы должны взять диаметр анода возможно близким к диаметру манжеты.

Другие размеры анода определяются из теплового расчета. К последнему мы перейдем после расчета корпуса выпрямителя, поскольку тепловой режим анода определяется относительными размерами анода, манжеты и корпуса выпрямителя.

60. Расчет корпуса выпрямителя

У большинства фирм корпус выпрямителя имеет цилиндрическую форму. Но и в тех случаях, когда форма корпуса более сложна, определение основных размеров корпуса целесообразно вести вначале применительно к эквивалентному цилиндру, введя в дальнейшем перерасчет на требуемую более сложную форму.



Фиг. 114. Размещение анодов на крышке выпрямителя.

Расчет любого корпуса сводится, таким образом, в первоначальной стадии к определению диаметра и высоты его.

Диаметр корпуса может быть определен, исходя из размещения на крышке выпрямителя нужного числа анодов. Если бы расстояние между соседними анодными манжетами S (фиг. 114), считаемое на дуге окружности, было известно, то мы могли бы

определить диаметр окружности центров анодов, пользуясь формулой

$$D_b = \frac{n(D_a' + S)}{\pi}, \quad (X,5)$$

где n — число анодов выпрямителя;

D_a' — длина дуги центральной линии, занимаемая манжетой;

S — расстояние между двумя соседними манжетами, считаемое по дуге центральной окружности.

В качестве ориентировочного критерия для определения величины S мы можем воспользоваться данными заводского опыта по выполненным конструкциям.

Такие данные для выпрямителей завода „Электросила“ приведены в табл. 24 [Л. VIII, 14].

ТАБЛИЦА 24

Некоторые характерные размеры (в мм) ртутных выпрямителей завода „Электросила“

Тип выпрямителя	Ток при напряжении 600 В в А	Число анодов	Наружный диаметр корпуса D_a	Диаметр анода D_a	Диаметр центральной линии анодов D_b	Диаметр катода D_k
РВ-5	500	6	1 000	185	794	180
РВ-10	1 000	6	1 200	206	994	265
РВ-20	2 000	12	1 380	206	1 174	360
РВ-40	4 000	12	1 850	295	1 555	424
РВ-70	7 000	12	2 300	385	1 915	500

По данным этой таблицы для каждого числа анодов мы можем построить кривую $D_b = f(D_a)$. Эта кривая, если развитие типов идет по геометрическому подобию, должна быть прямой линией. Действительно, если принять $D_a' \approx D_a$, то связь между D_b и D_a на основе уравнения (X,5) может быть переписана в таком виде:

$$D_b = k_1 D_a + k_2, \quad (X,5')$$

где

$$k_1 = \frac{n}{\pi} \quad \text{и} \quad k_2 = \frac{nS}{\pi},$$

при заданном числе анодов n суть величины постоянные.

Уравнение (X,5') указывает на прямолинейную зависимость между D_b и D_a .

По данным табл. 24 для 6- и 12-анодных выпрямителей мы получаем две прямые $D_b = f(D_a)$, нанесенные на фиг. 115.

Тангенс угла наклона этих прямых определяет постоянную k_1 для 6- и 12-анодных выпрямителей, а отрезки, отсекаемые данными прямыми, на оси ординат дают возможность определить размер S .

Рассчитаем в качестве примера корпус выпрямителя, для которого нами был выше определен диаметр манжеты.

Для 12-анодных выпрямителей завода „Электросила“ прямая a на фиг. 115 дает $k_1 = 4,0$, а $k_2 = 370$ мм.

Руководствуясь этими величинами и найденной ранее величиной $D_a = 275$ мм, мы получаем диаметр центральной линии

$$D_b = 4 \cdot 275 + 370 = 1470 \text{ мм.}$$

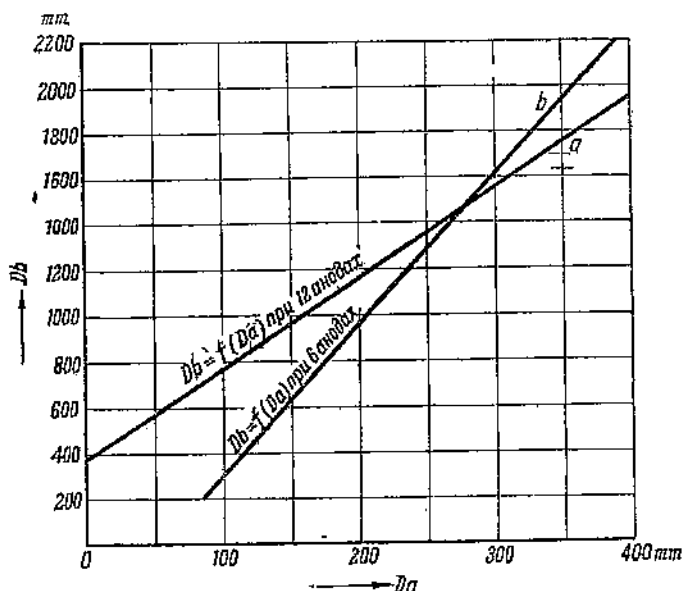
Диаметр корпуса D_t может быть определен по формуле

$$D_t = D_b + D_a + 2t, \quad (X,6)$$

где t — величина зазора между анодной манжетой и корпусом (фиг. 114). Выбирая по выпрямителям, выполняемым заводом „Электросила“, $t = 60$ мм, мы получаем

$$D_t = 1470 + 275 + 2 \cdot 60 = 1865 \text{ мм.}$$

Для сравнения в табл. 24 приведены значения D_t для выпрямителей завода „Электросила“.



Фиг. 115. Кривые зависимости диаметра центральной линии от диаметра анода. Для $n=6$ — кривая b ; для $n=12$ — кривая a .

Высоту „приведенного“ цилиндра корпуса мы можем определить или исходя из высоты анода или же по практическим данным об удельной кубатуре корпуса выполненных выпрямителей, отнесенной к 1 А выпрямленного тока. Эта величина для выпрямителей завода „Электросила“ колеблется в пределах от 0,3 до 0,5 л/А¹.

Обозначая удельную кубатуру через δ , мы имеем

$$V = I_p \delta = \frac{\pi D^2}{4} h \quad (X,7)$$

или

$$h = \frac{4 I_p \delta}{\pi D_t^2}. \quad (X,8)$$

¹ л — стандартное сокращенное обозначение литра (ОСТ 5859).

Беря для рассчитываемого в нашем примере выпрямителя $\delta = 0,5$ л/А, мы получаем

$$h = \frac{4 \cdot 4000 \cdot 0,5}{\pi \cdot 18,65^2} = 73,1 \text{ см.}$$

Перераспределение конденсационной поверхности между отдельными частями корпуса и конденсационным цилиндром может быть выполнено путем отыскания минимального объема корпуса, обеспечивающего достаточную поверхность, эффективно конденсирующую пары ртути.

После определения высоты корпуса мы можем установить и длину манжеты. При выборе последнего размера надо стремиться обеспечить надежную экранировку анода от непосредственно идущих от катода струй ртути, одновременно не слишком стесняя путь для дуги, горячей между анодом и катодом.

61. Расчет катода

В каждый данный момент рабочей частью катода являются катодные пятна, излучающие электроны. Но так как эти пятна непрерывно перемещаются, то отдача тепла катоду происходит почти равномерно по всей поверхности катода. Поэтому мы можем считать, что площадь катода при определенной допустимой величине удельных потерь на единицу поверхности катода должна быть пропорциональной абсолютной величине этих потерь.

Из общих потерь в дуге выпрямителя к доле, воспринимаемой катодом, могут быть отнесены, как показал Комптон [Л. VIII, 3], потери, целиком обусловленные катодным падением напряжения ΔU_{κ} , т. е.

$$\Delta P_{\kappa} = \Delta U_{\kappa} I_g. \quad (X,9)$$

Поскольку ΔU_{κ} есть величина постоянная, то из формулы (X,9) следует, что площадь катода S_{κ} должна быть пропорциональна току нагрузки,

$$S_{\kappa} = \frac{\pi D_{\kappa}^2}{4} = k_3 I_g. \quad (X,10)$$

Определяя из (X,10) диаметр катода, получаем

$$D_{\kappa} = \left(\frac{4 k_3 I_g}{\pi} \right)^{1/2} = k_4 I_g^{1/2}. \quad X,11)$$

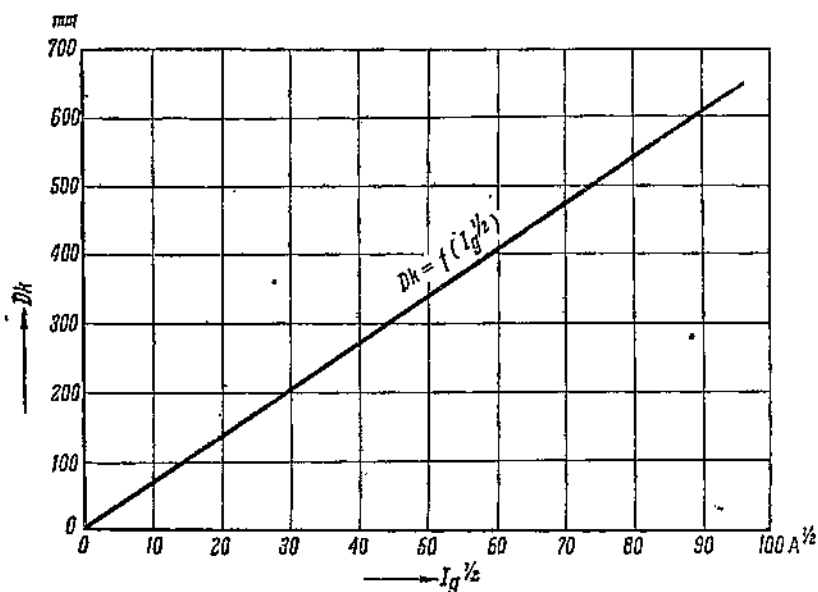
Постоянную k_4 мы можем также определить на основе данных заводского опыта. Для этого, пользуясь табл. 24, строим кривую

$D_{\kappa} = f(I_g^{1/2})$ (фиг. 116). Тангенс угла наклона полученной таким образом прямой определяет константу $k_4 = \operatorname{tg} \alpha$. Для выпрямителей завода "Электросила" $k_4 = 6,3$. Пользуясь этим коэффициентом, мы можем

определить диаметр катода в рассчитываемом нами выпрямителе ($I_g = 4000 \text{ A}$)

$$D_k = k_d I_g^{1/2} = 6,3 \cdot 63 = 400 \text{ mm.}$$

При выборе диаметра катода приходится считаться и с тем, чтобы изменение уровня ртути в катоде выпрямителя при переходе от состояния холостого хода, когда испарение ртути минимально, к полному нагрузочному режиму, когда испарение максимально, не было слишком велико. Это требование обуславливается ограниченным ходом иглы зажигания.



Фиг. 116. Кривые зависимости диаметра катода от $I_g^{1/2}$.

Фирмы, у которых единственным доступом внутрь выпрямителя является отверстие в корпусе, предназначенное для катода, размеры этого отверстия иногда из соображений удобства внутреннего осмотра выбирают заведомо большими.

62. Тепловой расчет анода

Для нормальной работы выпрямителя важно, как уже говорилось, установить как верхний, так и нижний пределы температуры анодной головки.

В качестве исходного уравнения для теплового расчета служит уравнение, определяющее баланс тепла, получаемого анодом от дуги P_a , и отдаваемого анодом окружающему пространству P_i непосредственным

излучением, конвекцией и путем теплопроводности через связанные с головкой анода металлические части.

Относя баланс энергии к единице времени, мы можем говорить о балансе мощности.

Мощность (в ваттах), получаемая анодом, может быть определена по формуле (VI, 13)

$$P_a = I_{a. \text{ср}} \left(\varphi + \frac{2kT_e}{e} + \Delta U_a \right).$$

Здесь $I_{a. \text{ср}}$ — среднее значение анодного тока за период, определяемое из формулы

$$I_{a. \text{ср}} = \frac{I_p}{p},$$

где p — число одновременно работающих анодов.

Из суммы, стоящей в скобках, представляющей собой мощность, отдаваемую аноду каждым ампером тока:

1. φ равно работе выхода. Для графитовой головки мы принимаем эту величину, так же как и для железной головки, равной 3,9 В [Л. V, 4].

2. Тепловая энергия, приносимая 1 А электронного тока в единицу времени $\frac{2kT_e}{e}$ при найденной нами ранее по кривой фиг. 36 температуре электронов $T_e = 20\,000^\circ \text{K}$, равна 3,42 В.

3. Анодное падение напряжения ΔU_a мы можем принять равным нулю, поскольку размеры анода мы выбираем (см. ниже) достаточно большими по сравнению с сечением плазмы.

Тогда

$$P_a = 333 (3,9 + 3,42) = 333 \cdot 7,32 = 2\,440 \text{ W}.$$

Полагая, что 10% тепла уносится путем теплопроводности через радиатор, мы получаем, что тепло, излучаемое анодом, будет

$$P_s = 0,9 \cdot 2\,440 \approx 2\,200 \text{ W}.$$

Для подсчета температурного баланса нам необходимо определить, далее, поверхность излучения анодной головки. Эту величину мы можем найти по допускаемой средней величине плотности тока $j_{a. \text{ср}}$, отнесенной к полной поверхности радиации анодной головки.

За поверхность радиации обычно принимают боковую цилиндрическую поверхность анодной головки, а также площадь основания, обращенного к дуге выпрямителя (см. линию анода, окаймленную на фиг. 117 пунктиром). Принимая среднюю плотность на анод $j_{a. \text{ср}} = 0,15 \text{ A/cm}^2$, мы получаем полную поверхность радиации анодной головки

$$S = \frac{I_a}{j_{a. \text{ср}}} = \frac{333}{0,15} \approx 2\,200 \text{ cm}^2.$$

Распределим эту поверхность между основанием и цилиндрической частью головки.

Диаметр манжеты в рассчитываемом нами примере был определен равным

$$D_{\text{ж}} = 27,5 \text{ см.}$$

Допуская зазор между анодом и манжетой в 2 см, мы получаем диаметр анода

$$D = 23,5 \text{ см.}$$

Давая аноду конфигурацию, показанную на фиг. 117, мы выбираем высоту цилиндрической и конусной частей такими, чтобы получить требуемую общую поверхность излучения для анода.

Количество излучаемого анодом тепла мы определяем по теоретической формуле, предложенной Муром [Л. VIII, 22] для концентрических цилиндров,

$$P = 5,7 \cdot 10^{-12} S_1 (T_1^4 - T_2^4) \frac{e_1 e_2}{e_1 \frac{S_1}{S_2} + e_2 - e_1 e_2 \frac{S_1}{S_2}}; \quad (X, 12)$$

здесь P — потери тепла на излучение в ваттах;

S_1 и T_1 — поверхность радиации в см^2 и температура внутреннего цилиндра в $^{\circ}\text{K}$;

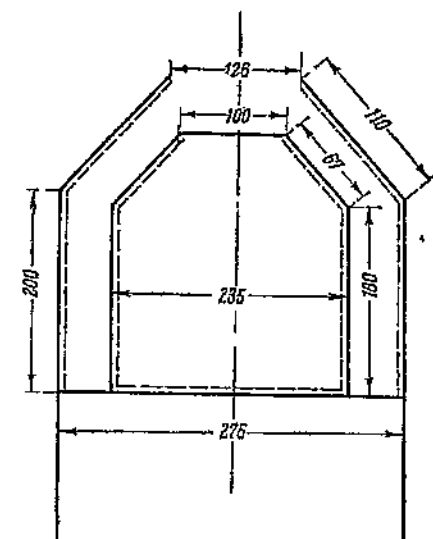
S_2 и T_2 — поверхность радиации и температура внешнего цилиндра в тех же единицах;

e_1 и e_2 — коэффициенты излучения поверхностей цилиндров.

Для графита $e_2 \approx 0,8$ (для температуры в пределах $500-700^{\circ}\text{C}$). Для железа $e_1 \approx 0,6$. Если количество излучаемого тепла, а также температура одного из цилиндров нам известны, то мы можем из данного уравнения определить температуру другого цилиндра.

Поскольку в нашем случае поток тепла идет от анода к манжете, а от последней направляется к сосуду выпрямителя, температура которого нам известна, то порядок расчета температур будет следующий:

По температуре корпуса $T_{\text{корп}}$ мы определяем температуру манжеты $T_{\text{ж}}$, а по последней определяется и температура анодной головки.

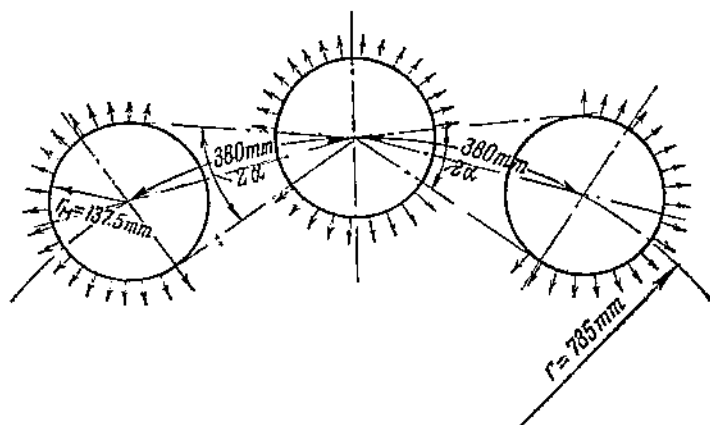


Фиг. 117. Эскиз с размерами анодной головки.

При расчете поверхности радиации манжеты мы должны принять во внимание:

1) что в передаче тепла, получаемого от анода, участвует только верхняя часть манжеты, расположенная против анода (пунктирный участок на фиг. 117), поскольку нижняя часть манжеты находится примерно в таких же температурных условиях, как и верхняя часть, благодаря энергии, получаемой ею от дуги, и не берет заметного тепла от верхней части манжеты благодаря значительному тепловому сопротивлению в продольном направлении (малое сечение стенок манжеты); поверхность радиации верхней части манжеты, определенная по эскизу, в нашем случае равна 2300 см^2 ;

2) что не вся поверхность манжет излучает тепло к сосуду (фиг. 118). Части поверхности манжет, которыми они обращены друг к другу (фиг. 118), тепла во вне не отдают, обмениваясь лишь равными пор-



Фиг. 118. Схема излучения тепла манжетами ртутного выпрямителя.

циями тепла между собой. Эта поверхность, подсчитанная по углу α , в нашем случае примерно равна 560 см^2 .

В результате полная эффективная поверхность радиации манжеты составляет

$$S_{\text{э}} = 2300 - 560 = 1740 \text{ см}^2.$$

Заменяя в дальнейшем подсчете отношение поверхностей радиации манжеты и корпуса S_1 и S_2 отношением радиуса манжеты $r_1 = 13,7 \text{ см}$ к расстоянию оси манжеты до корпуса $r_2 = 19,7 \text{ см}$ и принимая температуру корпуса

$$T_2 = T_{\text{корп}} = 45^\circ + 273^\circ = 318^\circ \text{ К},$$

мы получаем по (X,12) для $T_{\text{э}} = T_1$

$$2200 = 5,7 \cdot 10^{-12} 1740 (T_{\text{э}}^4 - 318^4) \frac{0,6 \cdot 0,6}{0,6 \frac{13,7}{19,7} + 0,6 - 0,6 \cdot 0,6 \frac{13,7}{19,7}},$$

откуда определяем

$$T_{\text{н}}^4 = 4810 \cdot 10^8 (^{\circ}\text{K})^4,$$

а затем

$$T_{\text{н}} = 830^{\circ}\text{K} = 557^{\circ}\text{C}.$$

Применяя тот же порядок для расчета температуры графитовой анодной головки $T_{\text{а}}$ и принимая $S_1 = 1960 \text{ см}^2$ и $\epsilon_1 = 0,8$ и оставляя для ϵ_2 прежнее значение, мы получаем

$$2200 = 5,7 \cdot 10^{-12} \cdot 1960 (T_{\text{а}}^4 - 830^4) \frac{0,8 \cdot 0,6}{0,8 \frac{1960}{2300} + 0,6 - 0,6 \cdot 0,8 \frac{1960}{2300}},$$

откуда

$$T_{\text{а}}^4 = 8042 \cdot 10^8$$

или

$$T_{\text{а}} = 947^{\circ}\text{K} = 947 - 273 = 674^{\circ}\text{C}.$$

63. Расчет колбы стеклянного ртутного выпрямителя

При установившемся тепловом режиме колбы тепло, выделяемое внутри колбы, равно количеству тепла, отдаваемого колбой среде.

Интенсивность теплоотдачи, измеряемая количеством ватт энергии, отдаваемых каждым кв. сантиметром стенки колбы при разнице в температурах между стенкой и охлаждающей средой в 1°C , зависит как от рода охлаждающей среды, так и от примененной системы охлаждения. Значения коэффициента теплоотдачи A для трех охлаждающих сред—воды, масла и воздуха—и двух систем воздушного охлаждения—при вентиляторе и отсутствии такового—приведены в табл. 25 [Л. VI, 1].

ТАБЛИЦА 25

Охлаждающая среда	Система охлаждения	Коэффициент теплоотдачи A в $\text{W}/\text{см}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Вода	Естественная циркуляция	0,045
Масло	"	0,0115
Воздух	" Вентилятор	0,005
"	Без вентилятора	0,001

Пользуясь этой таблицей и зная нагрузку колбы, мы можем определить требуемую поверхность охлаждения колбы, пользуясь формулой

$$S = \frac{P}{A\Delta t}, \quad (\text{X}, 13)$$

где P —мощность, выделяемая колбой;

Δt —допускаемый нагрев колбы сверх окружающей температуры.

Обычно поверхность отдельных частей колбы нагрета неодинаково. Особенно высокую температуру, как это видно из фиг. 119, имеют аноды выпрямителя, но при расчете мы исходим из средней температуры для всей колбы.

Пример. В качестве примера возьмем колбу стеклянного выпрямителя с током $I_g = 60$ А, охлаждаемую посредством вентилятора.

Определим вначале потери в колбе выпрямителя. Полные потери включают в себе потери в главной дуге и потери в анодах возбуждения.

Потери в дуге главных анодов

$$P_a = I_g \Delta U_g = 60 \cdot 22 = 1320 \text{ W.}$$

Потери в дуге анодов возбуждения

$$P_o = I_o \Delta U_o = 5 \cdot 18 = 90 \text{ W.}$$

Полные потери внутри выпрямителя составляют в этом случае

$$P = P_a + P_o = 1410 \text{ W.}$$

Среднюю допускаемую температуру колбы выпрямителя принимаем

$$t_1 = 60^\circ \text{ C.}$$

Высшую температуру окружающего воздуха оцениваем по нормам

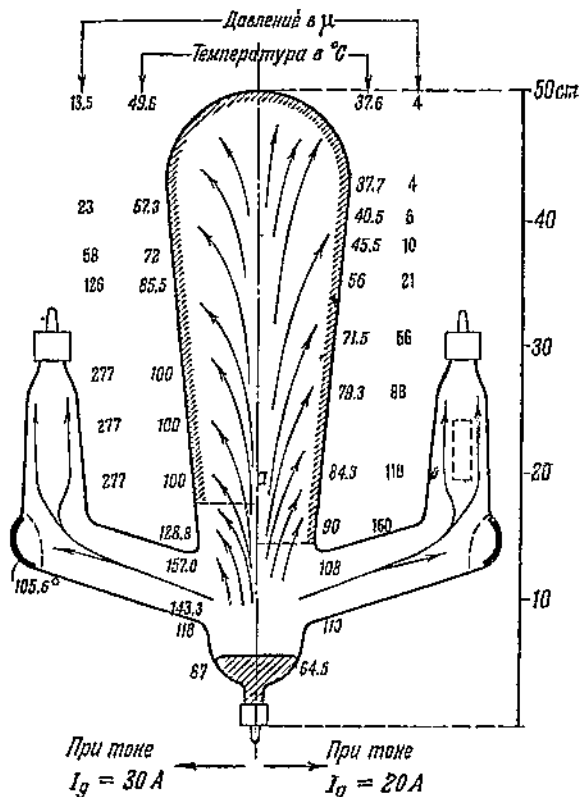
$$t_2 = 35^\circ \text{ C.}$$

Допускаемый перепад температуры будет в этом случае

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 25^\circ \text{ C.}$$

Значение величины A мы получаем из табл. 25

$$A = 0,005 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ \text{C.}$$



Фиг. 119. Распределение температуры вдоль колбы стеклянного выпрямителя. На левой стороне цифры показывают температуру и давление при нагрузке 30 А, а цифры справа—температуры при нагрузке в 20 А.

Для удовлетворения требуемым условиям нагрузки и температуры колба должна иметь поверхность охлаждения

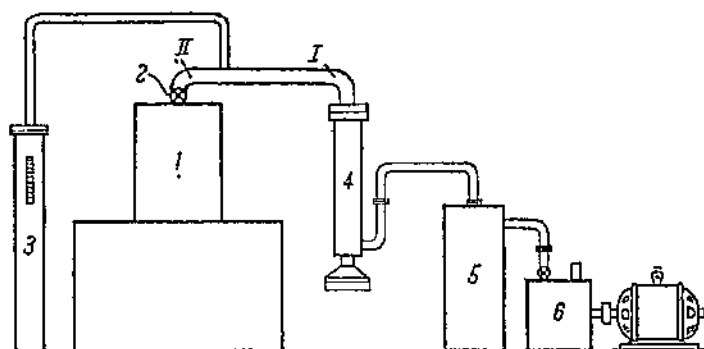
$$S = \frac{P}{\Delta t} = \frac{1410 \text{ W}}{0,005 \text{ W/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot 25^\circ\text{C}} = 11\,300 \text{ cm}^2.$$

ГЛАВА XI

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА И СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РТУТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

64. Вакуумная система выпрямителя

Существующие уплотнения металлического ртутного выпрямителя обычно не обеспечивают, как уже говорилось, полной герметичности корпуса. Поэтому для сохранения вакуума металлический выпрямитель нуждается в постоянно действующей вакуумной установке. Вакуумная установка металлического выпрямителя, схематически изображенная на фиг. 120, состоит из ртутного насоса 4, присоединяемого непосред-



Фиг. 120. Вакуумная схема металлического выпрямителя. 1 — ртутный выпрямитель; 2 — вакуумный кран; 3 — вакуумметр Мау-Леода; 4 — ртутный насос; 5 — форвакуумный бак; 6 — масляный насос.

ственно к выпрямителю 1, и масляного насоса 6, присоединяемого к ртутному насосу не непосредственно, а через промежуточный резервуар 5, называемый баком предварительного разрежения или форвакуумным баком.

Потребность в двух насосах вызывается тем обстоятельством, что масляный насос, работающий против атмосферного давления, не в состоянии создать те разрежения, которые требуются для выпрямителя, в то время как способный создать такие разрежения ртутный насос не может работать, однако, против атмосферного давления.

Поэтому функцию поддержания вакуума в выпрямителе эти два насоса делят между собой: масляный насос создает предварительное разрежение (форвакуум), исчисляемое в долях миллиметра или в миллиметрах ртутного столба, а ртутный насос, работая против форвакуума, создает требуемый вакуум в выпрямителе, измеряемый долями микрона или микронами ртутного столба ($10^{-3} - 10^{-4}$ mm Hg).

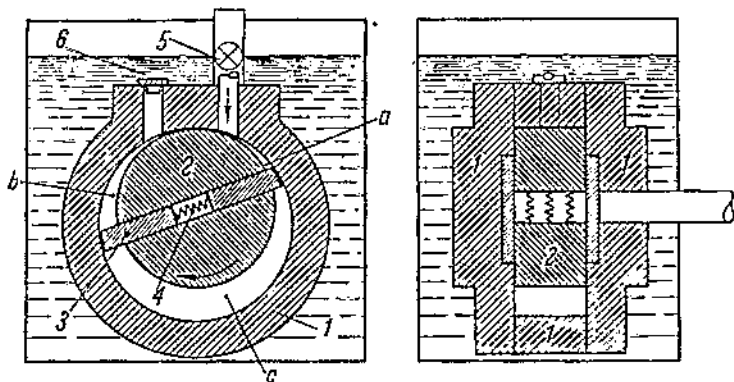
Наличие форвакуумного бака дает то преимущество, что масляный насос, разрежающий пространство в форвакуумном баке, может работать не все время, как это требуется от ртутного насоса, а только периодически, 15—20 мин. в сутки при нормальных условиях работы.

Кроме аппаратов, создающих вакуум в выпрямителе, последний нуждается также в измерительной системе для вакуума 3. Описание последней будет дано после рассмотрения работы вакуумной системы.

65. Масляный насос

Разрез наиболее распространенного типа масляного насоса, насоса Геде, дан на фиг. 121.

Как видно из этого рисунка, рассматриваемый насос состоит из стального цилиндрического корпуса 1, в котором вращается эксцентрично расположенный цилиндрический ротор 2. В последнем имеется



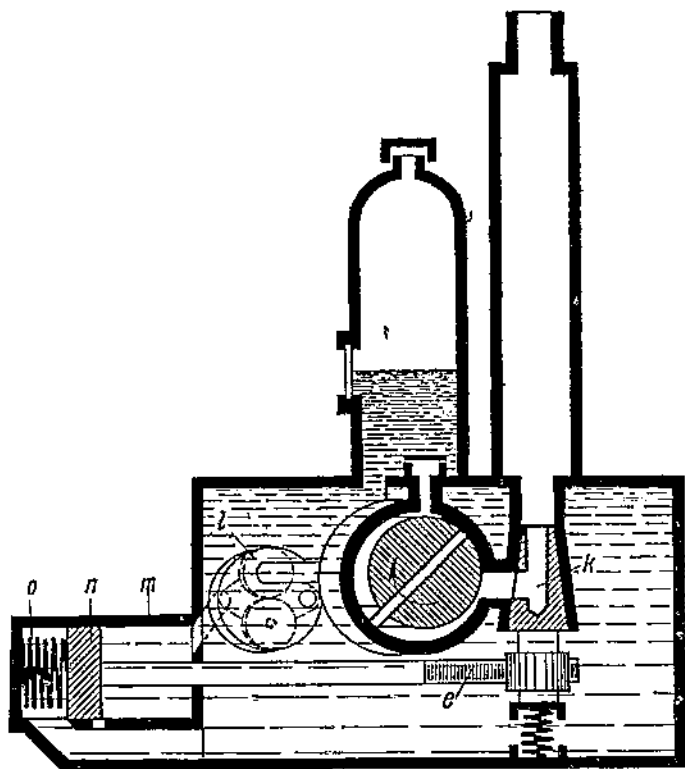
фиг. 121. Разрез масляного насоса завода „Электросила“. 1 — корпус насоса; 2 — ротор насоса; 3 — пластинка; 4 — пружина; 5 — форвакуумный кран; 6 — выпускной клапан.

прорез, в который вставлены две закаленные и отшлифованные лопатки 3, разжимаемые пружиной 4.

Когда ротор вращается, воздух засасывается в область *a* (ограниченную лопаткой и ротором, плотно прилегающим к корпусу), объем которой увеличивается, и выталкивается из области *b*, объем которой уменьшается. В области *c*, изолированной и от входного и от выходного отверстия, находится воздух, засосанный в период увеличения объема этой области, когда она находилась в таком же положении, как область *a*. При дальнейшем вращении эта область окажется соединенной с выходным отверстием, ее объем будет уменьшаться и воздух, находящийся в ней, будет выталкиваться наружу.

Запирающий клапан 6, представляющий собой тонкую металлическую пластинку, прижимается вниз слоем масла, в которое погружен весь насос. Часть масла, проникающая внутрь через подшипник и клапан насоса, играет весьма полезную роль, так как образующаяся перед лопаткой при вращении насоса перемещающаяся полоса дает необходимое добавочное уплотнение между двумя разделяемыми областями насоса.

В данном ротационном типе насоса при прекращении или ослаблении действия внешней приводной силы может быть нарушена герметичность лопаток из-за ослабления или прекращения действия центробежных сил и кроме того, возможна обратная работа насоса, при которой масло, а затем и воздух будет проходить в форвакуумный бак. Во избежание этого должны быть приняты специальные меры к тому, чтобы кран *б*, отсоединяющий вакуумную систему от насоса, автоматически закрывался при остановке насоса или при снижении числа оборотов.

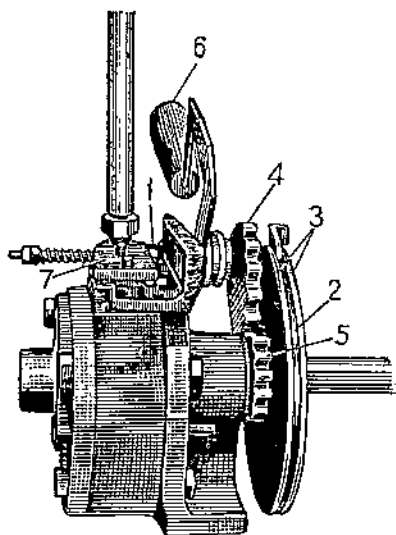


Фиг. 122. Разрез масляного насоса фирмы Броун-Бовери.
l — зубчатый насос; *n* — поршень; *k* — кран насоса; *e* — зубчатая рейка; *o* — пружина; *m* — цилиндр управления.

Для этого в конструкции, изображенной на фиг. 122 (насос Броун-Бовери), служит зубчатый насос *l*, при вращении ротора нагнетающий масло в цилиндр *m*. При полном числе оборотов давление масла на поршень *n* оказывается достаточным, чтобы отжать его в левое положение, действуя против сил пружины *o*. При этом кран *k* открыт. При снижении числа оборотов действие пружины начинает превалировать над силами давления масла на поршень и поршень переходит в крайнее правое положение. При этом он закрывает кран.

Американская фирма Джeneralь Электрик пользуется для автоматического закрытия крана реле, работающим на принципе центробежного регулятора. Контакты реле связаны с цепью соленоида, управляющего краном насоса.

Завод „Электросила“ для автоматического закрытия крана применяет устройство, фотография которого дана на фиг. 123. В данной конструкции жестко с валом насоса связан диск 2, который вращается между двумя другими свободно сидящими на валу дисками 3, механически связанными с зубчатым колесом 5, которое через зубчатый сектор 4 открывает вакуумный кран 1. Принцип работы этого устройства основан на изменении сил трения масла о металл при изменении относительного движения между ними. При достаточной скорости вращения насоса диск 2 увлекает за собой благодаря трению масла диски 3, поворот которых приводит к открытию вакуумного крана. При остановке насоса или падении числа оборотов противовес 6 запирает кран.



Фиг. 123. Приспособление для автоматического закрытия крана у насосов завода „Электросила“. 1—вакуумный кран; 2—внутренний диск, жестко связанный с валом; 3—наружные диски, связанные с зубчатым колесом 5; 4—зубчатый сектор; 5—зубчатое колесо; 6—противовес.

Масляный насос приводится во вращение электромотором мощностью от 0,3 до 0,5 kW. Наивыгоднейшее число оборотов колеблется в пределах от 350 до 500 в минуту. При этом диапазоне оборотов достижим предельный вакуум до 0,01 мм Hg. При числе оборотов от 1 000 до 1 500 эти насосы дают разрежение порядка 1 мм Hg.

Производительность масляного насоса (определение этого понятия см. ниже) равна примерно 5 000 см³ воздуха в секунду.

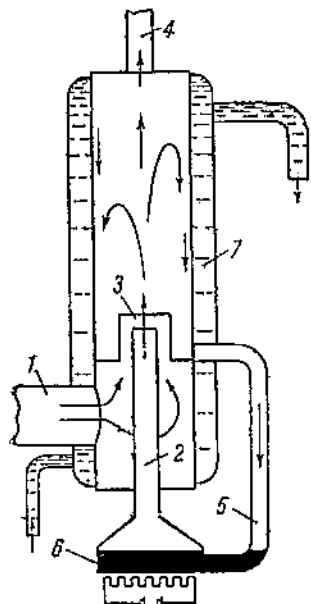
Так как корпус насоса металлически связан с корпусом выпрямителя, который может иметь весьма высокий потенциал (§ 48, d), приводная муфта между насосом и двигателем должна выполняться из изолирующего материала, и вся насосная установка должна быть изолирована от земли.

66. Ртутный насос

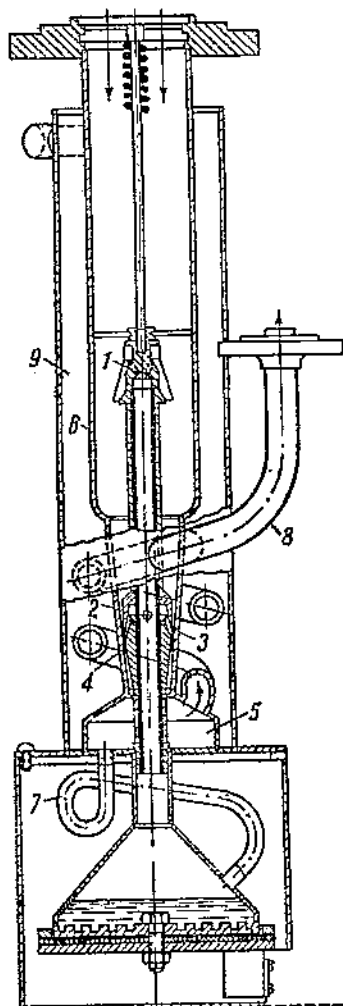
Высокий вакуум в выпрямителе создается и поддерживается ртутным насосом. Разрез одного из простейших ртутных насосов схематически показан на фиг. 124.

В насосе, представленном на этой фигуре, ртутные пары, получающиеся от испарения находящейся в сосуде ртути 6, подогреваемой

электрическим путем, выходят быстрым потоком из конца трубки 2 (сопла) и захватывают с собой молекулы газа, диффундирующие из откачиваемого резервуара 1. Попавшие в струю пара молекулы газа проталкиваются далее тяжелыми молекулами ртутного пара в направлении к трубке 4, соединенной с форвакуумным баком. Струя пара, выходящая из сопла расходящимся пучком, прилегая к стенкам наружной трубки, препятствует обратному проникновению газов. Так как стенки насоса охлаждаются водой, протекающей через водяную рубашку 7, ртутные пары конденсируются и ртуть через трубку 5 поступает обратно в ртутную чашку.



Фиг. 124. Схематический разрез ртутного насоса завода „Электросила“. 1—входная труба; 2—сопло; 3—горловина; 4—трубка форвакуума; 5—сток ртути; 6—печка с ртутью; 7—водяная рубашка.



Фиг. 125. Двухступенчатый ртутный насос. 1—1-е сопло; 2—щель прохода газов и ртути; 3—выход ртутного пара; 4—2-е сопло; 5—приемное пространство; 6—корпус конденсационной камеры; 7—отвод ртути в ртутницу; 8—газоотводная трубка; 9—водяная рубашка.

Такой насос может работать при протнводавлении, не превышающем 1 мм Hg. При желании получить ртутный насос, способный

работать при больших противодавлениях, его выполняют не с одним, а с несколькими соплами. Такой двухступенчатый насос, выполняемый заводом „Электросила“, показан на фиг. 125. В этом насосе пары ртути, направляясь вверх, вырываются из кольцевого сопла 1. Попадая под колпачок, они устремляются вниз, направляясь вдоль стенок сопла. В месте выхода ртутных паров из-под колпачка пары увлекают за собой диффундирующие сверху молекулы воздуха. Направляясь струей пара, молекулы воздуха идут вниз, к щели 4 второго сопла 2, где пар, выходя из трех круглых отверстий 3, повторно захватывает молекулы газа и выталкивает их в приемное пространство 5, откуда они через змеевик 8 уходят в форвакуумный бак.

Ртутные пары конденсируются на охлаждаемых водой стенках камеры 6. Сконденсировавшаяся ртуть сливается вниз в приемное пространство 5, откуда по трубке 7 попадает в ртутную чашку. Трубку 7, как видно из рисунка, имеет петлю, в этой петле всегда находится ртуть, которая препятствует выходу паров ртути через сливные отверстия. Единственный выход пары ртути имеют, таким образом, через сопла.

Водяная рубашка насоса 9 окружает в данной конструкции не только конденсационную камеру, но и выходной змеевик для газов. Это дает то преимущество, что могущие попасть в змеевик пары конденсируются в нем, не уходя в форвакуумный бак.

Подогрев ртути в доннице насоса производится обычно электрическим путем. Подогревный элемент печи питается от отдельного вспомогательного трансформатора с напряжением 120 или 220 V.

Для непрерывной работы ртутного насоса требуется безостановочная подача к насосу охлаждающей воды и электрическая энергия для нагрева ртути. Мощность, затрачиваемая на нагрев ртути, колеблется в зависимости от мощности насоса в пределах от 400 до 800 W.

67. Производительность насоса

Режим давления в выпрямителе устанавливается тогда, когда количество воздуха, убывающего вследствие откачки его насосами в сосуд выпрямителя, становится равным количеству воздуха, проникающего через неплотности швов. Количественное определение первой из этих величин связано с понятием производительности насоса; определение второй величины связано с понятием натекания. Поэтому для расчета предельного вакуума, который мы получаем при работе выпрямителя, нам необходимо предварительно ознакомиться с этими двумя понятиями.

Производительность гидравлического насоса определяется массой или объемом жидкости, перекачиваемой насосом в единицу времени. Для газового насоса объем откачиваемого газа мог бы также характеризовать производительность насоса, если бы давление газа в сосуде, из которого газ откачивается, было постоянным. Такой случай мы имели бы, например, при откачке воздуха из резинового шара, находящегося под постоянным атмосферным давлением. В этом случае про-

изводительность насоса мы могли бы определить по скорости изменения объема шара

$$S = - \frac{dV}{dt} \quad (XI,1)$$

В действительности же, когда речь идет о насосах, создающих вакуум, мы имеем дело с жестким эвакуируемым сосудом, объем которого остается величиной постоянной, а давление непрерывно меняется.

Поэтому в уравнение для производительности насоса нужно ввести не изменение объема, а изменение давления при заданном объеме. Иначе говоря, в формуле, определяющей производительность насоса, дифференциал объема dV должен быть выражен через дифференциал давления dp . Это мы можем сделать, написав закон Бойля-Марнотта, связывающий изменение объема с давлением

$$pV = (p + dp)(V + dV). \quad (XI,2)$$

Из этого уравнения мы можем найти зависимость dV от dp

$$dV = - \frac{dp}{p} V. \quad (XI,3)$$

Подставляя найденное выражение для dV в уравнение (XI,1), мы получаем, что производительность (в $\text{см}^3/\text{сек}$)

$$S = - \frac{dp}{p} V \text{ см}^3/\text{сек}. \quad (XI,4)$$

Это одна из формул, которой может быть выражена производительность насоса [Л. VIII, 19].

В данной форме производительность насоса определяется как произведение объема V на относительное изменение давления $\frac{dp}{p}$ в этом объеме V .

Разделив предварительно переменные

$$\frac{dp}{p} = - \frac{S}{V} dt, \quad (XI,4')$$

мы можем перейти от дифференциальной формы [к интегральной. Интегрируя правую часть дифференциального уравнения в пределах времени от t_1 до t_2 , а левую часть в пределах соответствующего изменения давления от p_1 до p_2 , мы получаем

$$\ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{S}{V} (t_2 - t_1), \quad (XI,5)$$

откуда

$$S = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \frac{p_1}{p_2} \text{ см}^3/\text{сек}. \quad (XI,6)$$

Это уравнение Геде. Оно позволяет дать несколько иную интерпретацию понятия производительности насоса. Действительно, если взять $t_2 - t_1 = 1$ сек., а $\frac{p_1}{p_2} = e$, то мы получаем, что $S = V$, т. е. что производительность насоса определяется объемом, в котором данный насос в состоянии уменьшить давление за 1 сек. в $e = 2,72$ раза.

Уравнение Геде представляет собой также удобную форму аналитического выражения для опытного определения производительности насоса. Измеряя в моменты времени t_1 и t_2 давление p_1 и p_2 и зная объем сосуда V , по уравнению (XI,6) легко определить производительность данного насоса.

Пример. Определить производительность ртутного насоса у выпрямителя РВ-10, имеющего емкость $V = 600$ л, если в момент времени t_1 давление $p_1 = 90$ μ Hg, а через 2 мин. давление в выпрямителе p_2 стало равным 50 μ Hg.

Пренебрегая натеканием в выпрямитель, подсчитываем S по формуле

$$S = \frac{600 \cdot 10^3 \text{ см}^3}{120 \text{ сек.}} \ln \frac{90}{50} = 2\,950 \text{ см}^3/\text{сек.}$$

Производительность ртутных насосов, изготовляемых заводом „Электросила“, приведена в табл. 26 [Л. VIII, 21].

ТАБЛИЦА 26
Производительность ртутных насосов к выпрямителям завода „Электросила“

Тип насоса	Производительность
РН-10	2 500 см ³ /сек
РН-14	4 000 "
РН-26	40 000 "

Производительность насоса, как показывает табл. 27, находится в большой зависимости от температуры охлаждающей воды. Как видно из этой таблицы, нормальная производительность насоса соответствует температуре входящей воды 15° С [Л. VIII, 21].

ТАБЛИЦА 27
Зависимость производительности ртутного насоса РН-10 от охлаждающей воды

Температура входящей воды	10	15	20	30	45	°С
Производительность насоса РН-10 . . .	3 100	2 500	2 200	1 400	480	см ³ /сек

При увеличении температуры входящей воды с 15 до 30°С производительность насоса падает почти в два раза. В том диапазоне давлений, при котором ртутные насосы обычно работают, их производительность мало зависит от давления в откачиваемом выпрямителе.

68. Влияние соединительных труб

Весьма большое влияние на производительность насоса оказывают трубы, соединяющие ртутный насос с выпрямителем. Действительно, если у конца трубы *I*, где приключен насос (фиг. 120), производительность насоса S_1 , то у конца *II*, присоединенного к откачиваемому резервуару, производительность его будет меньше, так как количество воздуха, проходящего через оба конца, одно и то же, а давление у конца *II* больше, чем давление у конца *I* (поскольку необходима определенная разность давлений $p_2 - p_1$ для перемещения воздуха по трубе).

Эта разность давлений может быть определена из формулы (аналогичной закону Ома)

$$Q = F(p_2 - p_1), \quad (XI,7)$$

где Q — количество воздуха, протекающего через трубу в 1 сек.

$$\left(\text{в } \frac{\text{см}^3}{\text{сек}} \cdot \frac{\text{дн}}{\text{см}^2} \right).$$

F — величина, характеризующая пропускную способность трубы (в $\text{см}^3/\text{сек}$).

Последняя величина, как показал Кнудсен, может быть численно определена по следующей формуле [Л. VIII, 19]:

$$F = \frac{D^3}{2,394 l \sqrt{p_1}}, \quad (XI,8)$$

где D — внутренний диаметр трубы в см;

l — длина трубы в см;

p_1 — плотность газа в $\text{г}/\text{см}^3$.

Беря $p_1 = 1,19 \cdot 10^{-3}$, что соответствует давлению $p = 1$ бару (1 бар = 0,75 μ Hg) и температуре $T = 20^\circ\text{C}$, при которых мы и определяем производительность насоса, мы для F получаем следующую упрощенную формулу:

$$F = \frac{r^3}{l} \frac{\text{см}^3}{\text{сек}}, \quad (XI,8')$$

где r — радиус трубы в мм;

l — длина трубы в см.

Обозначая производительность насоса у конца *I* через S_1 , а производительность у конца *II* через S_2 (результатирующая производительность), мы можем записать двойное равенство

$$Q = S_1 p_1 = S_2 p_2, \quad (XI,9)$$

откуда

$$\frac{Q}{S_2} - \frac{Q}{S_1} = p_2 - p_1. \quad (XI,10)$$

Подставляя $p_2 - p_1$ из уравнения (XI,7), мы получаем

$$\frac{Q}{S_2} - \frac{Q}{S_1} = \frac{Q}{F}, \quad (\text{XI},11)$$

откуда

$$S_2 = \frac{S_1 F}{S_1 + F}. \quad (\text{XI},12)$$

Эта формула показывает, какое большое значение для результирующей производительности насоса (производительность насоса с учетом влияния соединительной трубы) имеет пропускная способность трубы F .

Пример. Насос РН-14 присоединен к выпрямителю один раз через трубу с размерами $l=30$ см, $d=1,5$ см и другой раз через трубу с размерами $l=30$ см и $d=3$ см. Определить результирующую производительность насоса в том и другом случае.

В первом случае

$$F = \frac{r^3}{l} = 1\,400 \text{ см}^3/\text{сек}$$

и

$$S_2 = \frac{4\,000 \cdot 1\,400}{4\,000 + 1\,400} = 1\,035 \text{ см}^3/\text{сек}.$$

Во втором случае

$$F_1 = 11\,000 \text{ см}^3/\text{сек},$$

$$S_2 = \frac{4\,000 \cdot 11\,000}{4\,000 + 11\,000} = 2\,930 \text{ см}^3/\text{сек},$$

т. е. результирующая производительность насоса увеличивается почти в три раза.

Для того чтобы уменьшить влияние соединительной трубы, ртутный насос располагают возможно ближе к выпрямителю.

69. Натекание в корпус выпрямителя

Количество натекающего в выпрямитель воздуха в единицу времени определяется размером щелей и разностью давлений воздуха вне и внутри выпрямителя

$$Q = F_1 (p_0 - p), \quad (\text{XI},13)$$

где F_1 — пропускная способность щелей;

p_0 — давление наружного воздуха;

p — давление внутри выпрямителя.

Поскольку величина p ничтожно мала по сравнению с p_0 , мы можем этой величиной в указанном равенстве пренебречь и считать

$$Q = F_1 p_0. \quad (\text{XI},13')$$

Пропускную способность щелей F_1 (являющуюся для данного выпрямителя и его состояния величиной примерно постоянной) мы можем

выразить через объем воздуха V_0 , входящего внутрь корпуса за единицу времени, измеренный при наружном давлении p_0 , и написать

$$F_1 = Q = V_0 p_0. \quad (\text{XI}, 14)$$

Входя в выпрямитель, этот воздух расширяется до объема V , увеличивая при этом давление на величину p' , которая может быть определена по закону Бойля-Мариотта

$$p' = \frac{V_0 p_0}{V} = k_n. \quad (\text{XI}, 15)$$

Это увеличение давления за единицу времени является величиной постоянной для рассматриваемого выпрямителя и характеризует происходящее натекание воздуха.

Обычно k_n измеряется в $\mu \text{ Hg/h}$.

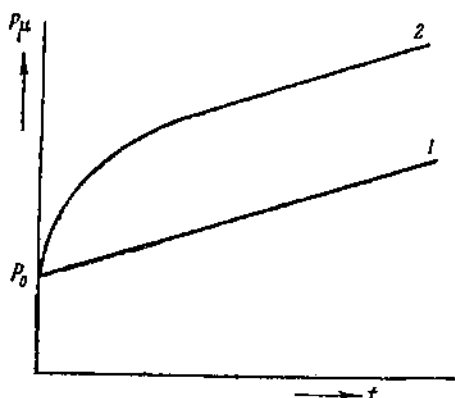
Нормально k_n не должно превосходить $0,5 \div 1 \mu \text{ Hg/h}$, причем меньшая цифра относится к большим объемам корпуса, а большая цифра — к меньшим объемам.

С течением времени давление в выпрямителе из-за натекания увеличивается по закону прямой¹ (кривая на фиг. 126), поскольку

$$p = k_n t. \quad (\text{XI}, 16)$$

В дифференциальной форме эта же зависимость определяется уравнением

$$\frac{dp}{dt} = k_n. \quad (\text{XI}, 17)$$



Фиг. 126. Кривые натекания выпрямителей. 1 — при отсутствии выделения газа стенками; 2 — при выделении газов стенками.

При выделении абсорбированных газов стенками выпрямителя давление в выпрямителе повышается значительно более интенсивно, изменяясь по кривой, примером которой может служить кривая 2 на фиг. 126.

70. Предельный вакуум в выпрямителе

Поскольку при стационарном режиме давлений в выпрямителе скорость откачки воздуха насосом, определяемая из равенства (XI,4)

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{S_2 p}{V}, \quad (\text{XI}, 18)$$

должна быть равна скорости натекания, определяемого равенством

$$\frac{dp}{dt} = k_n$$

¹ До тех пор, разумеется, пока мы можем считать $p \ll p_0$, см. уравнение (XI,13).

то, приравнивая правые части обоих равенств, мы получаем

$$\frac{S_2 p}{V} = k_n. \quad (\text{XI}, 19)$$

Последнее равенство позволяет определить предельный вакуум, который установится в выпрямителе при данном насосе и натекании

$$p = \frac{V k_n}{S_2}, \quad (\text{XI}, 19')$$

или результирующую мощность насоса S_2 , требуемую для обеспечения заданного вакуума при имеющемся натекании:

$$S_2 = \frac{V k_n}{p}. \quad (\text{XI}, 20)$$

Пример. Определить предельный вакуум в выпрямителе РВ-10 с объемом $V=6001$, если натекание в выпрямителе с учетом выделения оклюдированных газов составляет $16 \mu \text{ Hg/h}$, а насос РН-14 работает в одном случае через трубу $l=30 \text{ см}$ и $d=1,5 \text{ см}$, а в другом случае через трубу $l=30 \text{ см}$, $d=3 \text{ см}$.

Результирующую производительность насосов для обоих указанных случаев мы определили в предыдущем примере.

В первом случае она равна

$$S_2 = 1060 \text{ см}^3/\text{сек.}$$

Во втором случае она равна

$$S_2' = 2930 \text{ см}^3/\text{сек.}$$

Предельный вакуум в первом случае

$$p = \frac{V k_n}{S_2} = \frac{600 \cdot 10^3 \cdot 16}{3600 \cdot 1060} = 2,5 \mu \text{ Hg.}$$

Во втором случае предельный вакуум

$$p' = \frac{V k_n}{S_2'} = \frac{600 \cdot 10^3 \cdot 16}{3600 \cdot 2930} = 0,9 \mu \text{ Hg.}$$

Мощность ртутного насоса должна быть рассчитана на то, чтобы насос давал достаточно эффективную откачку при формовке выпрямителя (см. § 76), когда происходит наиболее сильное выделение газа внутри выпрямителя.

71. Измерение вакуума. Вакуумметр Мак-Леода

Для периодической проверки вакуума в выпрямителе служит вакуумметр Мак-Леода, изображенный на фиг. 127.

Как видно из этого рисунка, вакуумметр представляет собой стеклянную трубку, соединенную одним концом с чашкой 4, в которую налита ртуть, сообщаящаяся с атмосферой, а другим концом 1 с эва-

куируемым сосудом — с корпусом выпрямителя. Работа этого вакуумметра основана на законе Бойля-Мариотта для идеальных газов.

При нижнем положении чашки с ртутью 4 (левый чертеж фиг. 127) шаровой объем 2 и надстроенный над ним капилляр 3 заполняются газами из выпрямителя с тем давлением, которое надлежит измерить.

Для измерения давления чашка с ртутью приподнимается до тех пор (правый чертеж фиг. 127), пока уровень ртути в капилляре 6 не достигнет уровня верхнего конца запаянного капилляра 3 (оба капилляра при этом должны иметь одинаковый диаметр). При этом уровень ртути в запаянном капилляре 3 окажется ниже уровня ртути в правом капилляре на какую-то величину h , вследствие того что в этом капилляре остается весь тот газ, который заполнял раньше объем шара и левый капилляр.

Первоначальный объем этого газа может быть точно определен (по шаровому объему и капилляру), пусть он равен V_0 ; конечный объем газа V_1 также может быть определен по высоте h и сечению капилляра σ

$$V_1 = \sigma h. \quad (XI, 21)$$

Наконец, конечное давление газа p_1 в левом капилляре также можно считать известным и равным h (давлением газа на поверхность ртути в правом капилляре можно пренебречь по сравнению с давлением ртутного столба h).

Тогда в выражении закона Бойля-Мариотта

$$V_0 p_0 = V_1 p_1 \quad (XI, 22)$$

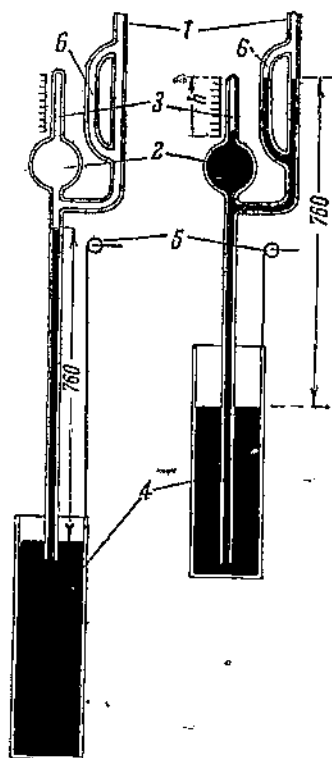
остается неизвестной только искомая величина первоначально существовавшего давления. Заменяя в (XI, 22) V_1 через σh и p_1 через h , находим, что-

$$p_0 = \frac{\sigma h^2}{V_0} = c h^2. \quad (XI, 23)$$

Величина c определяет так называемую постоянную вакуумметра. σ и V_0 , определяющие эту постоянную, обычно измеряются

по весу и объему ртути, который вмещает в себе шарик и капилляр. Так как объем шарика и диаметры капилляров не могут быть изготовлены точно по данным размерам, каждый вакуумметр должен быть градуирован.

При такой градуировке мы получаем шкалу A на фиг. 128. Вследствие неравномерности (квадратичности) данной шкалы отсчеты на



Фиг. 127. Вакуумметр Мак-Леода. 1 — конец, соединяемый с выпрямителем; 2 — шарик вакуумметра; 3 — запаянный капилляр; 4 — чашка с ртутью; 5 — блок для подъема ртути; 6 — сквозной капилляр.

очень малых и очень больших давлениях (порядка выше $40 \mu \text{ Hg}$) являются неточными. Для получения большей точности в отсчетах в указанном диапазоне измерений служат две другие шкалы *B* и *C*, нанесенные справа на измерительной доске. Эти шкалы соответствуют использованию вакуумметра как нормального барометра, и поэтому эти шкалы являются равномерными.

При пользовании данными шкалами ртуть в запаянном капилляре следует подводить к нулю соответствующей шкалы.

Сравнительные показания по шкалам *A* и *B* позволяют также определить присутствие внутри выпрямителя легко конденсирующихся паров (вода, бензин, спирт), вследствие того что при сжатии газа происходит их конденсация. При наличии таких паров показания по шкале *B* будут больше, нежели по шкале *A*, так как при измерениях по шкале *B* эти пары, будучи меньше сжаты, меньше и конденсируются, создавая свое парциальное давление [Л. VIII, 23].

Подъем чашки с ртутью производится при помощи струны, навешиваемой на блок (фиг. 127), или путем погружения поршня в неподвижную ртуть.

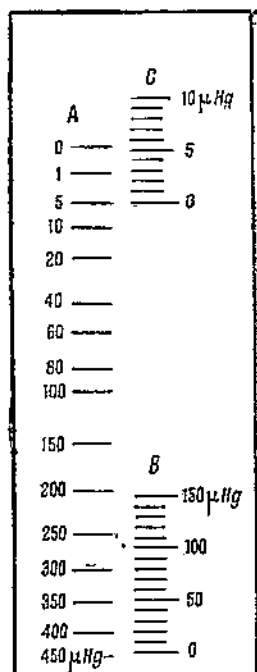
72. Электрический вакуумметр

Вакуумметр Мак-Леода имеет тот недостаток, что для измерения вакуума нужно совершить ряд операций: подойти к выпрямителю, поднять чашку с ртутью на соответствующий уровень, затем, сделав отсчет, вновь опустить чашку с ртутью в нормальное положение.

Стремление иметь прибор, непосредственно указывающий состояние вакуума, а также стремление автоматизировать управление вакуумной системой привело к введению в употребление электрического вакуумметра.

Принцип работы такого вакуумметра основан на том, что температура проволоки, помещенной в вакуум и нагреваемой постоянным по величине током, зависит от степени вакуума вследствие изменения конвекционной теплоотдачи. С изменением же температуры происходит изменение и электрического сопротивления проволоки. Для большей чувствительности к изменениям вакуума проволока должна быть нагрета током до $200\text{--}300^\circ \text{C}$, так как при этой температуре главная часть тепла уходит от проволоки через конвекцию.

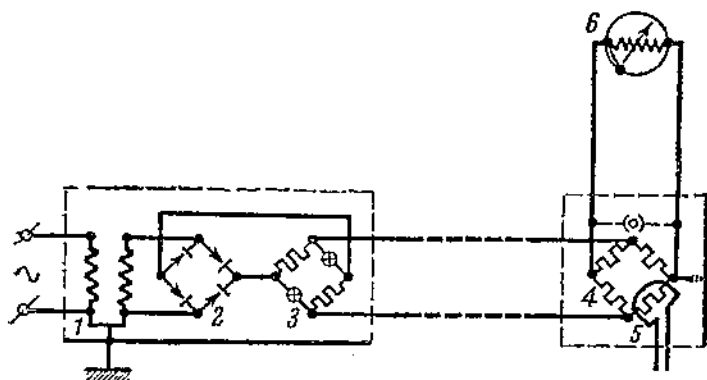
Этот принцип (принцип Пирани) получил свое практическое применение в целом ряде схем электрических вакуумметров. Одна из таких схем, собираемая заводом „Электросила“, показана на фиг. 129. В этой схеме сопротивление *Б*, помещаемое в вакуум, является одним из плеч моста Уитстона *А*, питаемого постоянным током, в гальванометр постоян-



Фиг. 128. Шкалы вакуумметра. *A*—квадратная шкала; *B* и *C*—прямые шкалы.

ного тока 6, включенный в мост, играет роль электрического индикатора вакуума.

Постоянный ток получается здесь от трансформатора 1 с купрокс-ным выпрямителем 2. Для питания цепи постоянным током может быть также применена маломощная аккумуляторная батарея или первичные элементы.



Фиг. 129. Схема электрического вакуумметра завода „Электросила“. 1 — понижающий трансформатор; 2 — вентиляльный мостик; 3 — мостик сопротивления; 4 — мостик вакуумметра; 5 — вакуумный зонд; 6 — гальванометр.

Ток в цепи при любом изменении сопротивления 5 должен поддерживаться постоянным. Для этой цели служит железо-водородное сопротивление (барретор), также собранное в данной схеме в мост 3.

78. Проверка натекания в выпрямитель

Весьма серьезным показателем качества выпрямителя является величина натекания в выпрямитель. Измерение этого натекания представляет некоторые особенности, на которых нужно остановиться [Л. VIII, 12].

Вакуумный кран у выпрямителей завода „Электросила“ располагается, как это показано на фиг. 120, между выпрямителем и местом присоединения вакуумметра.

Это дает возможность при одном вакуумметре произвести измерения вакуума:

- 1) в выпрямителе при работающем ртутном насосе и открытом вакуумном кране;
- 2) в соединительной трубе I-II (при работающем насосе и закрытом вакуумном кране);
- 3) в форвакуумном баке при закрытом вакуумном и форвакуумном кранах и неработающем ртутном насосе. Форвакуумный кран, как уже говорилось, отделяет масляный насос от форвакуумной системы.

При проверке натекания первое измерение давления p_1 должно быть произведено при открытом вакуумном кране и работающем насосе, когда в выпрямителе вакуум вполне установился. Второе измерение давления p_2 надо произвести спустя 10—12 час. после закрытия крана

и прекращения работы насоса. Такой промежуток времени необходим, чтобы натекание в выпрямитель определялось за достаточно длительный отрезок времени. Третье измерение p_3 должно быть произведено 10—15 мин. спустя после открытия крана (насос оставляется неработающим). 10—15-минутная пауза необходима для выравнивания давления в форвакуумном баке и выпрямителе. Тогда давление, которое существовало в выпрямителе перед открытием крана p'_1 (характеризующее натекание в корпус), определится на основе закона Бойля-Мариотта из формулы

$$p'_1 V_1 + p_2 V_2 = (V_1 + V_2) p_3; \quad (\text{XI}, 24)$$

здесь V_1 — объем корпуса выпрямителя;

V_2 — объем форвакуумного бака.

Для выпрямителей завода „Электросила“ эти объемы приведены в табл. 28.

ТАБЛИЦА 28

Объемы корпуса V_1 и форвакуумного бака V_2 выпрямителей завода „Электросила“ [Л. VIII, 12].

Тип выпрямителя	V_1 в л	V_2 в л
PB-5	260	100
PB-10	500	100
PB-20	1 070	100

Определяя p'_1 из формулы (XI, 24), получаем

$$p'_1 = \frac{(V_1 + V_2) p_3 - p_2 V_2}{V_1}.$$

Натекание в выпрямитель после нахождения p'_1 определяется по формуле

$$k_n = \frac{p'_1 - p_1}{t},$$

где t — время в часах между замерами p_1 и p_3 .

При желании проверить также и натекание в форвакуумном баке необходимо кроме измерения конечного давления в нем p_2 произвести измерение первоначального давления в нем p'_2 спустя 20—30 мин. после закрытия вакуумного крана. Эта выдержка во времени необходима для того, чтобы дать остыть электрической печке ртутного насоса настолько, чтобы действие этого насоса полностью прекратилось.

По двум измерениям p_2 и p'_2 мы можем определить натекание в форвакуумном баке. Оно будет равно

$$k'_n = \frac{p_2 - p'_2}{t'} \quad (X1,26)$$

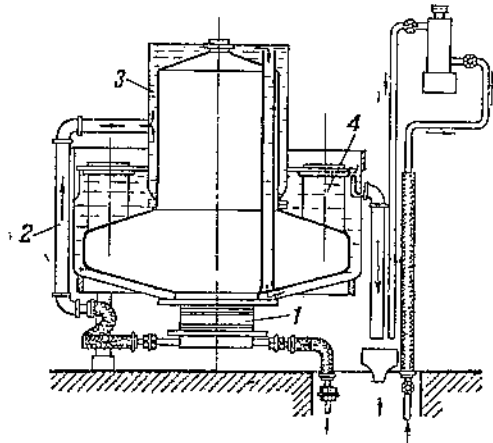
где t' — время, истекшее между промерами p_2 и p'_2 .

74. Система охлаждения металлического выпрямителя

Разные части выпрямителя принимают на себя различную долю общих потерь энергии в выпрямителе, и, кроме того, требования к температурам различных частей различны, поэтому при осуществлении

системы водяного охлаждения приходится предусматривать определенную последовательность в охлаждении различных частей выпрямительной установки.

Эту последовательность мы можем проследить по фиг. 130. Вода из охлаждающей системы поступает в выпрямитель двумя параллельными потоками. Один идет к выпрямителю, а другой — к ртутному насосу. Это обусловлено, во-первых, тем, что ртутный насос работает большей частью безостановочно (даже тогда, когда выпрямитель не работает), и, во-вторых, тем, что для достаточно высокой производительности насоса вода, охлаждающая насос, должна иметь возможно



Фиг. 130. Последовательность охлаждения ртутного выпрямителя.

более низкую температуру (табл. 27). Последовательность прохождения воды через самый выпрямитель показывают стрелки на фиг. 130. Вначале вода поступает в водяную рубашку катода 1, так как катод нуждается в наиболее холодной воде в связи с необходимостью свести к минимуму количество испаряющейся с катода ртути; затем вода через трубу 2, поступает в водяную рубашку конденсационного цилиндра 3, который для осуществления наиболее полной конденсации ртутных паров также нуждается в достаточно холодной воде. В последнюю очередь вода поступает в рубашку корпуса 4, в которой нагретая предыдущим обходом она создает наиболее благоприятные условия для рабочего режима выпрямителя.

Для изоляции от корпуса внешней водопроводной сети трубы, подводящие воду к выпрямителю и насосу, соединяются с металлическими частями не непосредственно (фиг. 130), а при помощи переходных резиновых шлангов. Отвод воды производится или также через резиновый шланг, или же через свободный сток, как показано на фиг. 130.

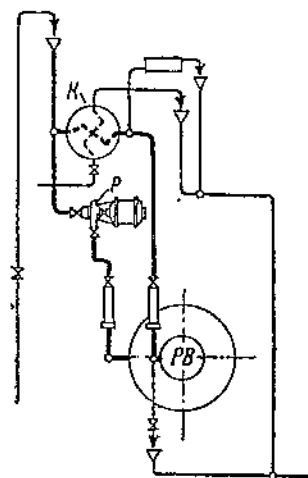
Охлаждающая вода должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Вода должна быть свободна от механических примесей во избежание загрязнения водопроводящих путей в выпрямителе.

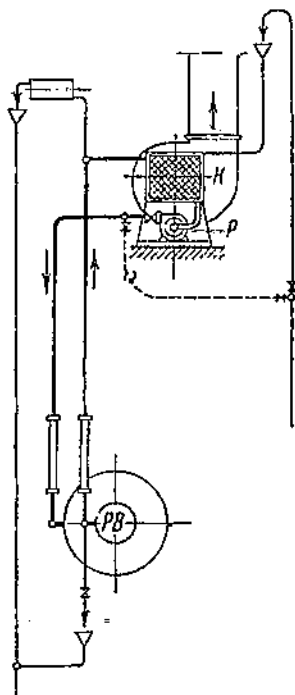
2. Жесткость воды не должна превышать 14° немецкой шкалы. При большей жесткости в связи с подогревом воды на стенках выпрямителя начинают осаждаться углекислые известки, ухудшающие теплообмен между водой и стенками и могущие с течением времени произвести полную закупорку водопроводящих путей в выпрямителе.

3. Вода не должна содержать кислот во избежание электролиза. Наличие кислотности определяется по электрическому сопротивлению воды. Сопротивление воды должно быть не ниже 2 000—2 500 Ом.

4. Содержание хлористых веществ не должно превышать 0,65—0,85 взвешен-



Фиг. 131. Система водяного циркуляционного охлаждения выпрямителя. *PB*—ртутный выпрямитель; *P*—насос; *K*—радиаторная система.



Фиг. 132. Система воздушно-водяного циркуляционного охлаждения выпрямителя. *PB*—выпрямитель; *K*—радиаторная система; *P*—насос.

ных частей на каждые 100 000 частей воды во избежание выделения на стенках окиси железа или хлористого железа. §

В зависимости от наличия источника и от качества охлаждающей воды может быть применена одна из следующих систем питания выпрямительной установки охлаждающей водой:

1) система непосредственного охлаждения выпрямителя проточной водой (показанная на фиг. 130);

2) система косвенного охлаждения выпрямителя проточной водой (фиг. 131);

3) система циркуляционного охлаждения (фиг. 132).

При первой системе охлаждения вода подводится непосредственно из близлежащего колодца или магистрали и отводится в сточный канал или канализацию. Эта система является наиболее простой и дешевой, но она может быть применена только тогда, когда качество воды удовлетворяет перечисленным выше требованиям и потенциал корпуса выпрямителя по отношению к земле не выше 2 000—3 000 V.

Если качество воды не отвечает указанным техническим требованиям и если трудно устранить предварительную очистку воды, лучше всего применять вторую систему охлаждения, изображенную на фиг. 131.

Здесь вода, непосредственно охлаждающая выпрямитель PB , циркулирует по замкнутой системе, включающей в себя насос P и радиаторную систему K . В последней происходит отдача тепла циркулирующей водой проточной воде, омывающей радиаторную систему.

Все механические или углекислые примеси, которые содержатся в проточной воде, осаждаются в этом случае в радиаторной системе, откуда они легко могут быть удалены. Данная система допускает, как это видно из фиг. 131, возможность в тех случаях, когда в этом может ощущаться временная нужда, использовать проточную воду и для непосредственного охлаждения выпрямителя.

В установках, где рабочий цилиндр выпрямителя имеет потенциал по отношению к земле выше 3 000 V, лучше применить циркуляционную систему охлаждения, изображенную на фиг. 132.

В данной системе, как видно из фигуры, вода проходит также через радиаторную систему K , но в данном случае эта система охлаждается не водой, а воздухом при продувании его вентилятором p .

При такой системе искусственного воздушного охлаждения потребная поверхность радиаторной системы заметно уменьшается. Воздушное охлаждение в данной системе облегчает изоляцию системы, находящейся под высоким потенциалом корпуса выпрямителя от земли. Данную систему охлаждения применяют также и в установках низкого напряжения, когда поблизости нет источника охлаждающей воды.

75. Количество охлаждающей воды

Если принять в расчет и некоторый дополнительный расход воды, потребляемой ртутным насосом, то количество охлаждающей воды может быть определено по полному количеству теряемой внутри выпрямителя энергии, хотя часть тепла уходит через теплоизлучение и конвекцию в окружающий воздух.

Теряемая внутри выпрямителя мощность равна

$$\Delta P_g = \Delta U_g I_g$$

или, выражая потери в килокалориях в минуту, получаем

$$\Delta P = 0,24 \Delta U_g I_g \cdot 10^{-3} \cdot 60.$$

Обозначая температуру входящей воды t_1 , а выходящей t_2 , мы получаем расход воды в литрах в минуту

$$Q = \frac{\Delta P}{(t_2 - t_1)} = \frac{14,4 \Delta U_g I_g}{(t_2 - t_1) 10^3}.$$

Если принять температуру входящей воды равной 15°C , а выходящей 45°C , а $\Delta U_g \approx 22\text{ V}$, то расход воды, подсчитанный по данной формуле, равен примерно 1 л/мин на каждые 100 A выпрямленного тока. При более высокой температуре входящей воды расход воды соответственно повышается.

Так как нормальные условия работы выпрямителя ограничивают его температуру не только верхней границей ($50\text{—}60^{\circ}\text{C}$), но и нижней ($35\text{—}40^{\circ}\text{C}$), то в связи с изменением нагрузки выпрямителя весьма желательно регулировать поток воды через выпрямитель. Этот процесс может быть автоматизирован путем включения термовентилей. Термовентиль содержит в себе легко расширяющуюся жидкость, которая в зависимости от температуры проходящей через вентиль воды в той или иной степени закрывает пропускающий воду кран путем воздействия на соответствующий поршень.

76. Формовка металлического выпрямителя

До включения выпрямителя в нормальную эксплуатацию из стенок вакуумного корпуса и из электродов выпрямителя должны быть до максимально возможной степени удалены оклюдированные в них газы. Иначе газы, выделяясь при нагреве выпрямителя, от первой нагрузки его током при полном рабочем напряжении неминуемо приведут к порче вакуума и следующему за этим обратному зажиганию.

Процесс обезгаживания, предварительно начатый еще на отдельных деталях (анод, ртуть, резина), в процессе производства выпрямителя заканчивается после полной сборки выпрямителя. Процесс такого обезгаживания собранного выпрямителя носит название процесса формовки.

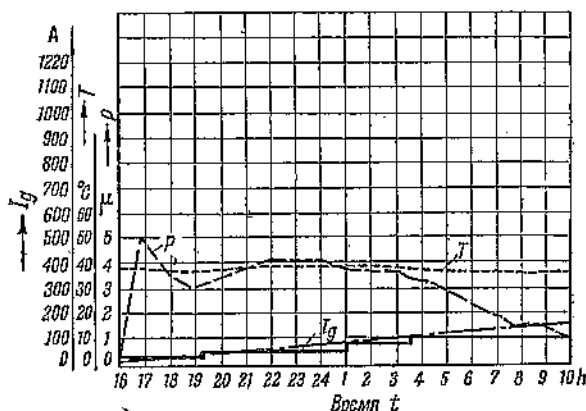
Формовка выпрямителя заключается в том, что в течение $4\text{—}5$ дней, а для более мощных выпрямителей и в течение более длительного срока выпрямитель нагревается до температуры, несколько превышающей рабочую температуру, и в течение этого времени из выпрямителя непрерывно откачивается воздух. Нагрев выпрямителя большей частью производится нагрузкой его током при низком напряжении, не превышающем $100\text{—}120\text{ V}$. В качестве источника питания при формовке обычно применяют формовочный трансформатор низкого напряжения. Начиная с малых токов, нагрузку на выпрямитель постепенно повышают, стараясь довести ее, если это позволяет температурный режим уплотнений, до $1,5$ -кратной величины от нормальной нагрузки. Повышение нагрузки при формовке выпрямителя приходится проводить постепенно, чтобы не получить слишком бурного выделения газов, при котором насосы перестают справляться с откачкой выделяемых газов. При слишком высоком давлении газа в выпрямителе может произойти обратное зажигание.

На возможность увеличения нагрузки указывает состояние вакуума, который в первый момент после включения нагрузки падает, а затем постепенно повышается. Для возможности плавной регулировки нагрузочного тока должен быть предусмотрен нагрузочный реостат, лучше всего водяной.

График практически проведенной формовки для выпрямителя РВ-20 показан на фиг. 133. На этом графике нанесены:

- 1) ток, постепенно увеличиваемый по мере получения устойчивого вакуума (кривая I_g);
- 2) давление (кривая p);
- 3) температура корпуса (кривая T).

Наилучшим режимом формовки является такой режим, когда кривая давления без скачков идет неуклонно вниз. Такая кривая достигается



Фиг. 133. График ведения формовки металлического РВ. I_g — кривая нагрузки; P — кривая вакуума; T — кривая температур.

тогда, когда переход от одного нагрузочного режима к другому производится не раньше, чем обеспечен достаточно надежный вакуум, не падающий при переходе к более высокому режиму нагрузки. Время, требующееся для проведения полной формовки, может быть исчислено по средней скорости повышения нагрузки, составляющей 200—300 А в сутки.

ГЛАВА XII

СХЕМЫ ПИТАНИЯ РТУТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

77. Применяемые схемы

При питании ртутных выпрямителей от однофазной сети применяется схема с нулевым выводом у трансформатора, описанная нами в § 3.

Когда выпрямители присоединяются к трехфазной сети, вторичная обмотка трансформатора выполняется трехфазной только для выпрямителей сравнительно небольшой мощности (маломощные стеклянные выпрямители). У трансформаторов, питающих выпрямители средней и большой мощности, вторичная обмотка имеет шесть, двенадцать и даже более фаз.

Это делается для того, чтобы получить возможно меньшие пульсации в кривых выпрямленного тока и напряжения, а также меньшие гармонические высшего порядка в кривых переменного тока, кроме того, это дает лучшее использование трансформатора.

Из большого числа возможных схем шестифазного выпрямления нашли себе применение, главным образом, две специальные схемы:

1. Схема — звезда-двойная звезда с однофазным дросселем, называемым катушкой Кюблера.

2. Схема — звезда-двойной зигзаг. Схемы: — звезда-шестифазная звезда и треугольник-шестифазная звезда, являющаяся логическим развитием нормальных схем трехфазного трансформатора в выпрямительной технике, находят себе чрезвычайно ограниченное применение.

Причины этого лежат в тех особенностях, с которыми связана работа выпрямительного трансформатора, у которого отдельные фазы трансформатора нагружаются током поочередно, что представляет собой предельный случай неравномерной нагрузки фаз трансформатора.

78. Схемы звезда-звезда и треугольник-звезда

Данные схемы применяются обычно, как выше уже указывалось, для питания маломощных стеклянных выпрямителей.

Соотношения токов и напряжений во вторичной обмотке трансформатора при трехфазной схеме уже были нами рассмотрены в § 4.

Токи в первичной обмотке мы можем определить, если воспользоваться законами Кирхгофа для электрической и магнитных цепей.

При соединении первичной обмотки в звезду (фиг. 134,а) токи в нулевой точке звезды связаны по первому закону Кирхгофа уравнением

$$i_A + i_B + i_C = 0. \quad (\text{XII},1)$$

По закону полного тока (второй закон Кирхгофа для магнитной цепи) ампервитки, охватывающие магнитный контур, проходящий через сердечники I и II (фиг. 134), связаны уравнением

$$i_A w_1 - i_B w_1 + i_b w_2 - i_a w_2 = 0, \quad (\text{XII},2)$$

если пренебречь током холостого хода.

Для магнитного контура, проходящего через сердечники II и III, аналогичное уравнение будет

$$i_B w_1 - i_C w_1 + i_c w_2 - i_b w_2 = 0. \quad (\text{XII},3)$$

Ведя расчет для „приведенного“ трансформатора, т. е. полагая $w_1 = w_2$, мы можем уравнения (XII,2) и (XII,3) заменить уравнениями

$$i_A - i_B + i_b - i_a = 0, \quad (\text{XII},2')$$

$$i_B - i_C + i_c - i_b = 0. \quad (\text{XII},3')$$

Решая совместно уравнения (XII,1), (XII, 2') и (XII,3'), мы находим интересующие нас („приведенные“) токи:

$$\left. \begin{aligned} i_A &= \frac{2}{3} i_a - \frac{1}{3} i_b - \frac{1}{3} i_c, \\ i_B &= -\frac{1}{3} i_a + \frac{2}{3} i_b - \frac{1}{3} i_c, \\ i_C &= -\frac{1}{3} i_a - \frac{1}{3} i_b + \frac{2}{3} i_c. \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII,4})$$

В первую треть периода, когда горит первый анод,

$$i_a = i_g, \quad i_b = i_c = 0,$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} i_A &= \frac{3}{2} i_a = \frac{2}{3} i_g, \\ i_B &= -\frac{1}{3} i_a = -\frac{1}{3} i_g, \\ i_C &= -\frac{1}{3} i_a = -\frac{1}{3} i_g. \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII,5})$$

Из этих уравнений мы видим, что первичная обмотка, соответствующая нагруженной током вторичной обмотке, несет $\frac{2}{3}$ тока а остальные две обмотки несут по $\frac{1}{3}$ тока.

В соответствии с полученными уравнениями на фиг. 134, с построены диаграммы первичного тока по диаграмме вторичного тока (фиг. 134, б) в предположении: 1) что выпрямленный ток не имеет пульсаций благодаря бесконечно большой индуктивности, включенной в цепь выпрямленного тока, и 2) что в цепи трансформатора отсутствует индуктивность, мешающая мгновенному переходу тока с анода на анод.

Из полученных диаграмм мы видим, что, в то время как по вторичной обмотке трансформатора течет только выпрямленный ток, в первичной обмотке протекает чисто переменный ток несинусоидальной формы.

При соединении первичной обмотки трансформатора в треугольник фазовые токи остаются теми же, что и при звезде; линейные же токи (фиг. 134, а) являются разностью фазовых токов.

Действующее значение первичного „приведенного“ для коэффициента трансформации $k=1$ тока определяется на основе диаграммы этого тока:

$$I_1' = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\left(\frac{2}{3} I_g \right)^2 \frac{2\pi}{3} + \left(\frac{1}{3} I_g \right)^2 \frac{4\pi}{3} \right]} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_g. \quad (\text{XII,6})$$

При учете реального коэффициента трансформации k ток в первичной обмотке равен

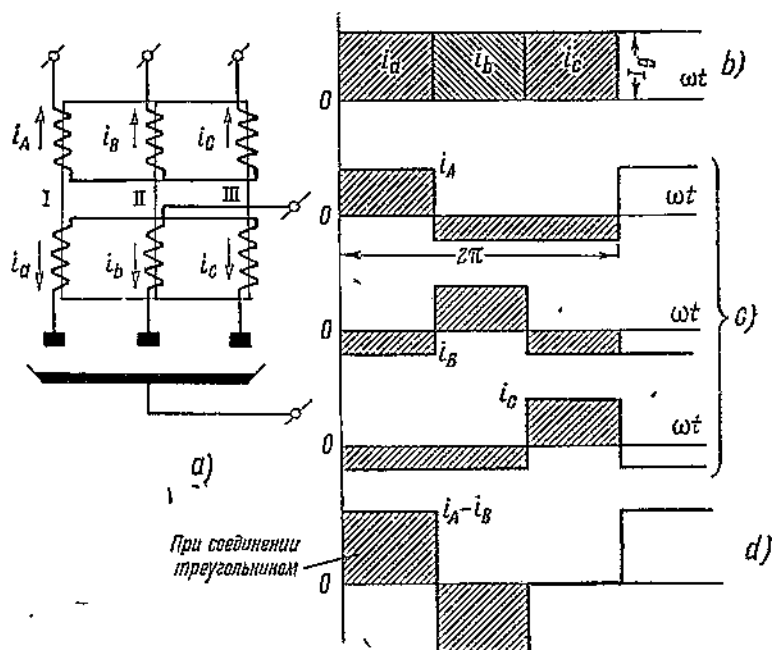
$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{1}{k} I_g. \quad (\text{XII,6'})$$

Расчетная мощность вторичной обмотки трансформатора определяется по формуле

$$P_2 = m_2 I_2 E_2. \quad (\text{XII}, 7)$$

Если вместо I_2 и E_2 подставить их выражения через E_{g0} и I_g по уравнениям (II, 24) и (XII, 29), а вместо m_2 число фаз, равное в данном случае трем, то будем иметь

$$P_2 = 3 \frac{I_g}{\sqrt{3}} \frac{E_{g0}}{1,17} = 1,48 P_g. \quad (\text{XII}, 7).$$



Фиг. 134. Схема трехфазного выпрямления и распределение токов в ней. *a* — электрическая схема соединения; *b* — токи вторичной обмотки; *c* — токи в трех фазах первичной обмотки; *d* — токи в линии при соединении первичной обмотки треугольником.

Расчетная мощность первичной обмотки

$$P_1 = m_1 I_1 U_1 = 3 \frac{\sqrt{2}}{3k} I_g \frac{k E_{g0}}{1,17} = 1,21 P_g. \quad (\text{XII}, 8)$$

Типовая мощность трансформатора

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{1,48 + 1,21}{3} P_g = 1,345 P_g. \quad (\text{XII}, 9)$$

Коэффициент мощности выпрямительной установки λ является произведением двух коэффициентов [Л. V, 8]:

1) коэффициента сдвига $\cos \varphi$, характеризующего сдвиг основной волны тока по отношению к основной волне напряжения;

2) коэффициента искажений γ , определяемого наличием гармоник в цепи переменного тока;

$$\lambda = \gamma \cos \varphi \quad (\text{XII}, 10)$$

и может быть найден, как отношение мощности выпрямленного тока кажущейся мощности, потребляемой в цепи переменного тока

$$\lambda = \frac{P_g}{P_1} \quad (\text{XII}, 10')$$

В рассматриваемой схеме

$$\lambda = \frac{P_g}{1,21 P_g} = 0,827. \quad (\text{XII}, 10'')$$

79. Влияние индуктивности трансформатора. Внешняя характеристика выпрямителя

До сих пор мы считали, что ток переходит с анода на следующий анод мгновенно, т. е. что ток резко возрастает (фиг. 134, *a*) от нуля до рабочей величины и затем также резко падает к нулю по истечении периода работы данного анода. Этому соответствуют вертикальные участки на диаграммах тока (фиг. 134, *b*). Фактически такие резкие изменения анодного тока невозможны, поскольку в обмотках трансформатора всегда имеются индуктивности от потоков рассеяния.

Переходя к учету влияния индуктивности на работу выпрямителя, рассмотрим схему многофазного выпрямителя (фиг. 135, *a*) в период перехода тока с первого анода на второй.

Переход тока с анода на анод при наличии индуктивности связан, естественно, с некоторым промежутком времени, в течение которого обмотка, питающая анод, прекращающий свою работу, отдает энергию, накопленную в магнитном поле потока рассеяния, а обмотка, питающая анод, вступающий в работу, накапливает энергию.

В результате мы получаем одновременную работу двух анодов, поскольку вступление в работу очередного анода начинается с того момента (точка *a* пересечения кривых напряжений на фиг. 135, *c*), когда у предыдущего анода ток начинает только падать.

Период одновременной работы анодов, обозначенный на диаграммах фиг. 135, *c* и *d* углом γ , называется периодом перекрытия (кривые токов перекрывают друг друга) или же периодом коммутации, а измеряющий этот период угол γ носит название угла перекрытия или угла коммутации.

Период коммутации характерен тем, что мгновенное значение напряжения в цепи выпрямленного тока (напряжение между нулем трансформатора и катодом) определяется уже не только мгновенным значением переменного напряжения в соответствующей фазе вторичной обмотки трансформатора, но и э. д. с. самоиндукции, которые наводятся потоком рассеяния в связи с изменением тока в обмотке.

Еще до решения вопроса о том, по какому закону изменяются токи, мы можем определить, чему должна быть равна э. д. с. самондукции в фазах в период коммутации и как, следовательно, проходит кривая мгновенных значений выпрямленного напряжения.

Действительно, поскольку аноды (в рассматриваемом случае аноды 1-й и 2-й) горят одновременно, то и потенциалы их по отношению к катоду одинаковы, и так как, кроме того, обмотки трансформатора, связанные с данными анодами, имеют общий потенциал у нулевой точки, то отсюда следует, что и результирующее напряжение в коммутируемых фазах должно быть одинаковым.

Общая кривая напряжения должна проходить между кривыми фазовых э. д. с. e_1 и e_2 , поскольку э. д. с. самондукции в фазе с нарастающим током (фаза 2) вычитается из фазовой э. д. с. e_2 , а в фазе с убывающим током (фаза 1) э. д. с. самондукции суммируется с фазовой э. д. с. e_1 .

Если далее принять, что ток во внешней цепи $i_g = i_1 + i_2$ и в период коммутации остается неизменным благодаря значительной индуктивности L_g в цепи выпрямленного тока, то, дифференцируя равенство

$$i_1 + i_2 = \text{const},$$

мы получаем

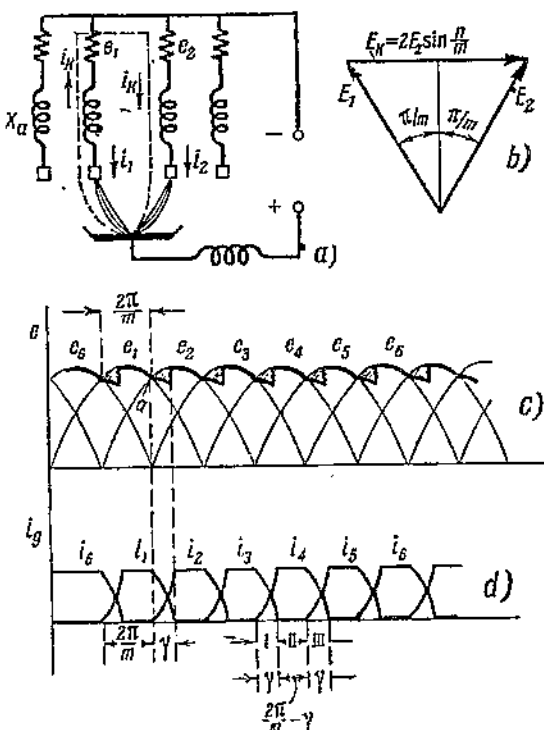
$$\left| \frac{di_1}{dt} \right| = \left| \frac{di_2}{dt} \right|,$$

что при равенстве индуктивностей в разных фазах трансформатора приводит к равенству

$$|e_{1s}| = |e_{2s}| = |e_s|, \quad (\text{XII}, 11)$$

из равенства (XII, 11) в свою очередь следует, что общее напряжение в период коммутации

$$e_g = e_1 + e_{1s} = e_2 - e_{2s} = \frac{e_1 + e_2}{2} \quad (\text{XII}, 12)$$



Фиг. 135. Схема коммутации тока, a — коммутируемый контур; b — векторная диаграмма напряжений в коммутируемых фазах; c — линейная диаграмма выпрямленного напряжения; d — диаграмма анодных токов.

является среднеарифметическим из фазовых напряжений (фиг. 135, а), а э. д. с. самоиндукции является полуразностью этих напряжений

$$e_s = \frac{e_2 - e_1}{2}. \quad (\text{XII}, 13)$$

По окончании периода коммутации кривая выпрямленного напряжения начинает совпадать с синусоидой напряжения анода, вступившего в работу.

Явление коммутации, связанное с наличием индуктивности в обмотках трансформаторов от потоков рассеяния, ведет, как показывает ход кривой по фиг. 135, с, к снижению мгновенных, а следовательно, и среднего значения выпрямленного напряжения, т. е. в период коммутации в выпрямительной установке имеет место индуктивное падение напряжения.

Величину этого падения мы можем подсчитать, зная угол γ , а величина последнего определяется, если известен ход кривых анодных токов в период коммутации.

Аналитическую зависимость для токов мы можем установить или путем совместного решения двух дифференциальных уравнений для напряжений в коммутируемых фазах или, воспользовавшись, как это предложил Деленбах [Л. XII, 1], методом суперпозиции, рассматривая два тока: 1) ток внутренний или ток коммутации i_k , протекающий через обмотки обеих коммутируемых фаз и через две горящие дуги, и 2) ток внешний, проходящий через обмотки трансформатора в цепь выпрямленного тока.

Пользуясь последним методом, определяем вначале ток коммутаций i_k . Этот ток проходит по фазам обеих обмоток под действием разности фазовых э. д. с.

Из векторной диаграммы, данной на фиг. 135, б, и из формулы (XII, 13) следует, что эта разность равна

$$e_2 - e_1 = 2 e_s = 2 \sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m} \sin \omega t, \quad (\text{XII}, 14)$$

если за начало счета времени принять момент, когда $e_1 = e_2$, т. е. момент начала коммутации. Индуктивное сопротивление для тока определяется не только индуктивностью рассеяния вторичной обмотки, но и индуктивностью первичной обмотки и сети [Л. II, 1], поскольку обе обмотки трансформатора индуктивно связаны.

Для упрощения расчетов мы полагаем, что вся индуктивность, показанная на схеме фиг. 135, а в виде отдельных реактивных катушек, сосредоточена во вторичной обмотке трансформатора ¹ и что активное сопротивление обмоток $r_a = 0$.

Ток i_k в этом случае равен

$$i_k = \frac{2 \sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{2 X_a} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = - \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{X_a} \cos \omega t. \quad (\text{XII}, 15)$$

¹ Такое предположение дает, как показал опыт, не во всех случаях достаточно точные результаты. Поэтому в тех случаях, где требуется большая точность в расчетах, необходимо считаться с распределением индуктивности по обеим обмоткам трансформатора [Л. II, 1].

В фазе 2 направление тока i_k совпадает с направлением анодного тока i_2 , а в фазе 1 направление анодного тока i_1 противоположно току i_k .

Полный ток в фазах обмоток отличается от данного тока на величину постоянной составляющей, учитывающей фактически вторую составляющую тока

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= -i_k + A = \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{X_a} \cos \omega t + A, \\ i_2 &= i_k + B = \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{X_a} \cos \omega t + B. \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII}, 16)$$

Постоянные A и B мы определяем из начальных условий: в первой фазе при $t=0$

$$i_1 = I_g,$$

во второй фазе при $t=0$

$$i_2 = 0.$$

Подставляя значение $t=0$ и соответствующие им значения токов, мы получаем

$$\left. \begin{aligned} A &= I_g - \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{X_a}, \\ B &= \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{X_a}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII}, 17)$$

Подставляя найденные значения постоянных в уравнения (XII, 16), мы находим

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= I_g - \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{X_a} (1 - \cos \omega t), \\ i_2 &= \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{X_a} (1 - \cos \omega t). \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII}, 18)$$

Кривые токов, построенные по этим уравнениям, показаны на фиг. 135, d.

Эти кривые получены в предположении, что активные сопротивления в обмотках трансформатора равны нулю.

По любому из уравнений (XII, 18) мы можем определить угол перекрытия γ , поскольку мы знаем, что при $\omega t_1 = \gamma$, где t_1 — время коммутации, ток $i_1 = 0$, а ток $i_2 = I_g$.

Из первого уравнения мы находим, что

$$(1 - \cos \gamma) = \frac{I_g X_a}{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}, \quad (\text{XII}, 19)$$

откуда

$$\cos \gamma = 1 - \frac{I_g X_a}{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}. \quad (\text{XII}, 19')$$

Полученное выражение для γ позволяет нам теперь перейти к определению падения напряжения, вызванного индуктивностью трансформатора.

Величина теряемого напряжения определяется средней высотой площади, заштрихованной на фиг. 135, с. Это значение равно

$$\begin{aligned} e_r &= \frac{1}{\frac{2\pi}{m}} \int_0^\gamma e_g d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{2\pi}{m}} \int_0^\gamma \sin \omega t d(\omega t) = \\ &= \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{2\pi}{m}} (1 - \cos \gamma). \end{aligned} \quad (\text{XII}, 20)$$

Подставляя вместо $(1 - \cos \gamma)$ значение этого выражения из формулы (XII, 19), мы получаем

$$e_r = \frac{I_g X_a}{\frac{2\pi}{m}}. \quad (\text{XII}, 20')$$

Полученная формула показывает, что индуктивное падение напряжения в выпрямителе прямо пропорционально току нагрузки I_g , величине индуктивности в обмотках трансформаторов (приведенной к вторичной обмотке) X_a и числу фаз m .

Поскольку индуктивность трансформатора определяется обычно по величине напряжения короткого замыкания трансформатора

$$e_k^{0/0} = \frac{I_1 X_1}{U_1} 100,$$

то для практических расчетов удобнее в формулу вместо X_a ввести $e_k^{0/0}$.

Для этого обе части равенства (XII, 20') делим на E_{c0} и умножаем на 100.

Получаем

$$e_r^0/0 = \frac{e_r}{E_{g0}} 100 = \frac{I_g X_a}{\frac{2\pi}{m} E_{g0}} 100. \quad (\text{XII}, 21)$$

Заменяя I_g через

$$I_1' = I_1 k = \frac{I_g}{a}$$

и E_{g0} через

$$U_1' = \frac{U_1}{k} = \frac{E_{g0}}{b},$$

$$\left. \begin{aligned} I_1' &= I_1 k = \frac{I_g}{a} \\ U_1' &= \frac{U_1}{k} = \frac{E_{g0}}{b} \end{aligned} \right\} (\text{XII}, 22)$$

где a и b — постоянные коэффициенты, а также X_a через $\frac{X_1}{k^2}$, мы получаем

$$e_r^0/0 = \frac{a I_1 k^2 X_1}{2\pi b U_1 k^2} 100 = \frac{a \cdot m I_1 X_1}{2\pi \cdot b U_1} 100 = A e_k^0/0. \quad (\text{XII}, 23)$$

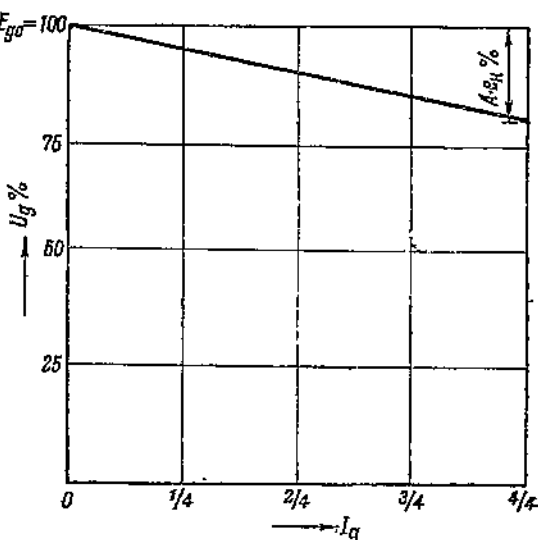
Коэффициент A , учитывающий кратность процентного падения напряжения на стороне выпрямленного тока по отношению к $e_k^0/0$, имеет для различных схем различные значения, поскольку значения a и b в формуле (XII, 22), определяющие этот коэффициент, также различны.

Выпрямленное напряжение при полной нагрузке выпрямителя, если не учитывать омического напряжения в обмотке трансформатора и падения в дуге, равно

$$\begin{aligned} U_g &= E_{g0} - \frac{e_r^0/0}{100} E_{g0} = \\ &= E_{g0} \left(1 - A \frac{e_k^0/0}{100} \right). \quad (\text{XII}, 24) \end{aligned}$$

При других нагрузках падение напряжения, как это видно из формулы (XII, 20), пропорционально току, и поэтому внешняя характеристика выпрямителя прямолинейна (фиг. 136) в диапазоне

тех нагрузок, при которых в коммутации участвует не больше двух анодов. При заметном увеличении нагрузки сверх нормальной величины вследствие роста индуктивного падения напряжения периода коммутации увеличивается и все большее и большее число анодов включается в одновре-



Фиг. 136. Внешняя характеристика выпрямительной установки.

менную работу. Тогда ход внешней характеристики теряет прямолинейный характер [Л. II, 1].

Стремясь к меньшему падению напряжения из-за индуктивности, мы должны стремиться к минимальным значениям X_a , но при малых индуктивностях трансформаторов токи короткого замыкания могут настолько возрасти, что вызываемые ими электродинамические усилия начинают угрожать прочности обмоток трансформатора.

Поэтому при проектировании трансформатора останавливаются на средних значениях напряжения короткого замыкания. Для рассматриваемых ниже схем значения $e_k^0/0$ выбираются обычно в пределах от 6 до 10%.

Кроме влияния на ход кривой напряжения процесс коммутации, как мы видели, влияет и на форму кривых токов, а также на продолжительность горения каждого из анодов, увеличивающуюся на угол γ . Оба эти изменения влияют на величину действующего значения анодного тока.

Для подсчета последнего выделяем на кривой анодного тока i_1 (фиг. 135, *d*) три участка:

Первый участок — период нарастания тока; на этом участке ход кривой определяется вторым уравнением (XII, 18). Этот участок измеряется углом γ .

Второй участок — прямая, параллельная оси абсцисс. Этот участок имеет продолжительность, измеряемую углом $\frac{2\pi}{m} - \gamma$.

Наконец, третий участок — период спадания тока к нулю; он имеет продолжительность, также измеряемую углом γ . Ход кривой на этом участке может быть определен по первому уравнению (XII, 18).

Действующее значение анодного тока определится при этих условиях равенством

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^\gamma i_a^2 d(\omega t) + I_g^2 \left(\frac{2\pi}{m} - \gamma \right) + \int_0^\gamma i_1^2 d(\omega t) \right]}. \quad (\text{XII}, 25)$$

Заменяя ωt через x и подставляя в уравнение (X, 25) значения i_1 и i_2 из (X, 18), предварительно заменив выражение

$$\frac{\sqrt{2}E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{X_a}$$

через значение этого выражения, получаемого из уравнений (X, 20) и (X, 20'), мы получаем

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{I_g}{\sqrt{m}} \sqrt{1 - \frac{m}{\pi} \int_0^\gamma \left[\frac{1 - \cos x}{1 - \cos \gamma} - \left(\frac{1 - \cos x}{1 - \cos \gamma} \right)^2 \right] dx =} \\ &= \frac{I_g}{\sqrt{m}} \sqrt{1 - m \left[\frac{(2 + \cos \gamma) \sin \gamma - (1 - 2 \cos \gamma) \gamma}{2\pi (1 - \cos \gamma)^2} \right]} \quad (\text{XII}, 25') \end{aligned}$$

или

$$I_a = \frac{I_g}{\sqrt{m}} \sqrt{1 - m\psi(\gamma)}, \quad (\text{XII}, 25'')$$

где

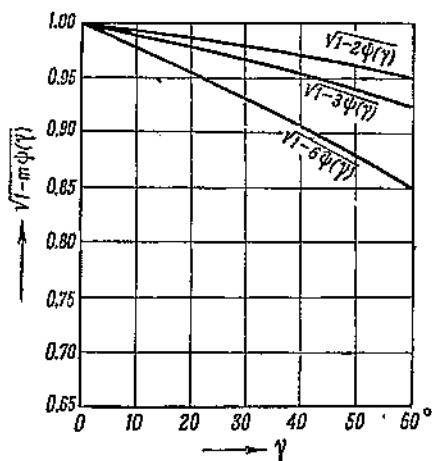
$$\psi(\gamma) = \frac{(2 + \cos \gamma) \sin \gamma - (1 - 2 \cos \gamma) \gamma}{2\pi(1 - \cos \gamma)^2}. \quad (\text{XII}, 26)$$

Таким образом мы видим, что благодаря перекрытию действующее значение тока изменилось в $\sqrt{1 - m\psi(\gamma)}$ раз. Значение этой функции, подсчитанное для двух, трех и шести фаз, дано в зависимости от угла перекрытия кривыми фиг. 137.

Расчетная мощность вторичной обмотки трансформатора определяется при учете перекрытия равенством

$$P_2 = mE_2 I_2 = \\ = \sqrt{m} I_g E_2 \sqrt{1 - m\psi(\gamma)}. \quad (\text{XII}, 27)$$

Так как для углов перекрытия, имеющих место в рассматриваемых схемах, при нормальной нагрузке значения функции $\sqrt{1 - m\psi(\gamma)}$ сравнительно мало отличаются от единицы, то в практических расчетах значением коэффициента как при подсчете токов, так и при подсчете мощности часто пренебрегают.



Фиг. 137. Зависимость функции $\sqrt{1 - m\psi(\gamma)}$ от угла коммутации γ .

80. Схема звезда-шестифазная звезда

Связывая середины вторичных обмоток трехфазного трансформатора в общую нулевую точку, мы получаем на вторичной стороне трансформатора (стороне, связанной с цепью выпрямленного тока) шестифазную звезду (фиг. 138, а)¹. Нумерация фаз на схеме этого рисунка дана в той последовательности, в которой чередуется, как это можно видеть из векторной диаграммы фиг. 138, б, работа отдельных анодов.

На фиг. 138, с, d, e показаны диаграммы напряжений и токов для рассматриваемой схемы.

Анодные токи (фиг. 138, d) даны в предположении, что индуктивность в цепи выпрямленного тока бесконечно велика и период коммутации равен нулю.

Среднее значение анодного тока определяется при этих условиях в общем случае для m -фазного выпрямителя по формуле

$$I_a = \frac{I_g}{m}, \quad (\text{XII}, 28)$$

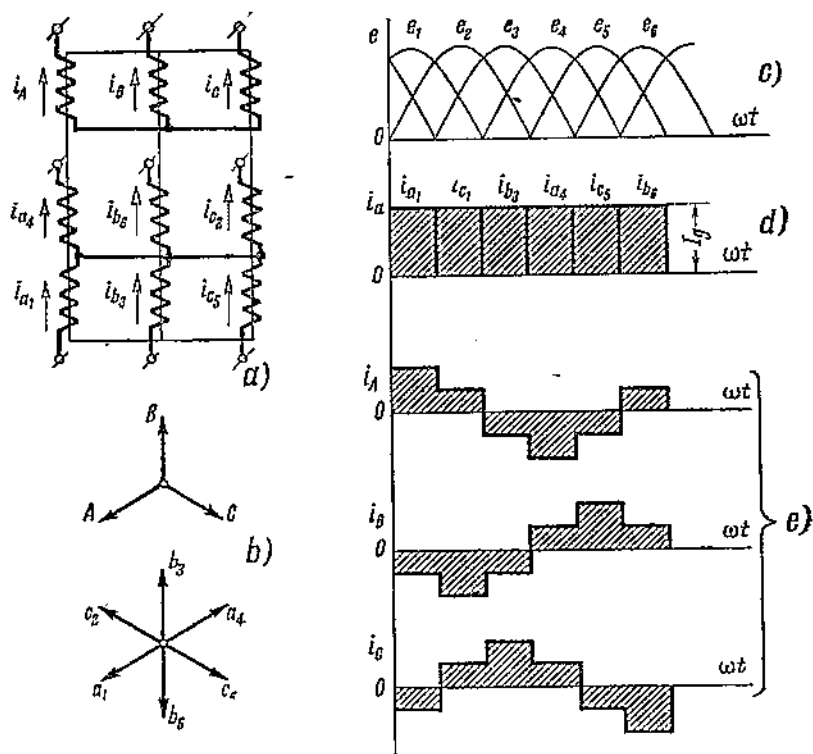
¹ При осуществлении такой связи необходимо обратить внимание на то, чтобы обмотка каждой из фаз была равномерно распределена по всему сердечнику.

значение тока во вторичной обмотке трансформатора

$$I_2 = \frac{I_g}{\sqrt{m}}. \quad (\text{XII}, 29)$$

Отношение значения тока во вторичной обмотке трансформатора к среднему значению анодного тока

$$\frac{I_2}{I_a} = \sqrt{m} \quad (\text{XII}, 30)$$



Фиг. 138. Схема звезда-шестифазная звезда и распределение токов и напряжений в ней. *a*—электрическая схема соединений; *b*—векторная диаграмма напряжений; *c*—линейная диаграмма напряжений; *d*—токи во вторичной обмотке трансформатора; *e*—токи в фазах первичной обмотки.

для рассматриваемого случая, когда $m=6$:

$$I_a = \frac{I_g}{6}; \quad I_2 = \frac{I_g}{2,45}; \quad \frac{I_2}{I_a} = 2,45. \quad (\text{XII}, 31)$$

Токи первичной обмотки определяются, так же как и для схемы звезда-звезда, по уравнениям, составленным на основе законов Кирхгофа. Так как уравнения для данной схемы должны отличаться от уравне-

ний (XII,1), (XII,2) и (XII,3), составленных для трехфазной схемы, только тем, что вместо одного тока вторичной обмотки войдет разность токов, протекающих по двум вторичным обмоткам, расположенным на одном сердечнике, то для данного случая мы можем также воспользоваться результирующими уравнениями (XII,4), сделав соответствующие подстановки в токах. Тогда мы получаем:

$$\left. \begin{aligned} i_A' &= \frac{2}{3}(i_{a_1} - i_{a_2}) - \frac{1}{3}(i_{b_1} - i_{b_2}) - \frac{1}{3}(i_{c_1} - i_{c_2}), \\ i_B' &= -\frac{1}{3}(i_{a_1} - i_{a_2}) + \frac{2}{3}(i_{b_1} - i_{b_2}) - \frac{1}{3}(i_{c_1} - i_{c_2}), \\ i_C' &= -\frac{1}{3}(i_{a_1} - i_{a_2}) - \frac{1}{3}(i_{b_1} - i_{b_2}) + \frac{2}{3}(i_{c_1} - i_{c_2}). \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII,32})$$

На основе этих уравнений можно построить кривые (приведенного) первичного тока. Токи в фазах *A*, *B* и *C* имеют одинаковую форму, но сдвинуты друг по отношению к другу на угол 120° (фиг. 138, *в*).

Эффективное значение первичного тока (приведенного ко вторичной обмотке), подсчитанное по линейной диаграмме для фазы *A*, равно

$$I_1' = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \frac{2\pi}{3} \left[\left(\frac{1}{3} I_g \right)^2 + \left(\frac{2}{3} I_g \right)^2 + \left(\frac{1}{3} I_g \right)^2 \right]} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_g \quad (\text{XII, 33})$$

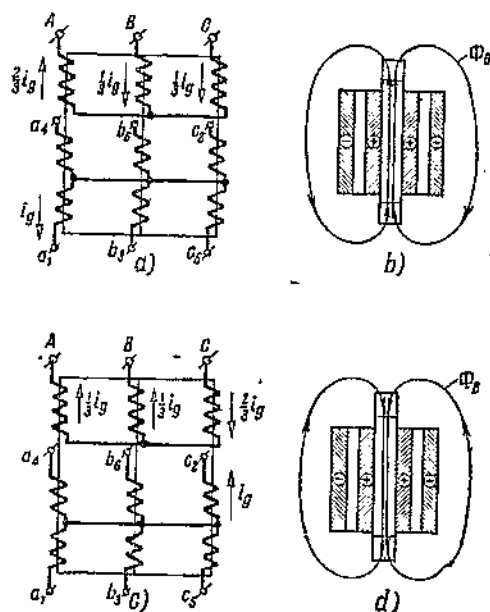
Для того чтобы выяснить, как распределяются ампервитки по сердечникам, рассмотрим какую-либо часть периода, скажем, промежуток времени, когда горит первый анод. В эту часть периода все анодные токи (фиг. 138, *д*) кроме тока первого анода равны нулю.

Токи в первичной обмотке для данной части периода, определенные по уравнениям (XII, 32), равны

$$\left. \begin{aligned} i_A &= \frac{2}{3} i_{a_1} = \frac{2}{3} i_g, \\ i_B &= -\frac{1}{3} i_{a_1} = -\frac{1}{3} i_g, \\ i_C &= -\frac{1}{3} i_{a_1} = -\frac{1}{3} i_g. \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII,34})$$

Такое токораспределение показано на схеме фиг. 139, *а*. Из этого рисунка мы видим, что на каждом из сердечников трансформатора имеется по $\frac{1}{3}$ нескомпенсированных ампервитков, направленных в рассматриваемую шестую часть периода на всех сердечниках вверх. Эти нескомпенсированные ампервитки создают поток однофазного намагничивания, который не может замкнуться как нормальный рабочий поток через ярмо трансформатора, а вынужден по выходе из сердечников замкнуться через воздух, как это схематически показано на фиг. 139, *б*. Этот поток называют также потоком вынужденного намагничивания. Его величина равна примерно 30% от рабочего потока.

При переходе дуги на второй анод нескомпенсированные ампервитки на каждом из сердечников остаются по величине те же (фиг. 138, *c*), но они меняют свое направление. Вместе с ними меняет свое направление и поток однофазного намагничивания (фиг. 139, *d*). Такое изменение направления потока однофазного намагничивания происходит каждый раз, когда ток переходит от одного анода к другому (от четного анода к нечетному, и наоборот). Поток однофазного намагничивания меняет, таким образом, шесть раз свое направление за один период переменного тока, т. е. этот поток имеет тройную частоту.



Фиг. 139. Распределение мгновенных значений токов при работе одного из анодов. *a* — при работе анода *a*; *b* — направление потока однофазного намагничивания при работе анода *a*; *c* — распределение токов при работе анода — *c*; *d* — направление потока однофазного намагничивания при работе анода *c*.

весьма большом диапазоне нагрузок, что и ограничивает применение данной схемы специальными случаями, при которых большое индуктивное падение напряжения является полезным (формовка выпрямителя, зарядка аккумуляторных батарей и пр.).

Мощность вторичной обмотки при шестифазном режиме ее работы

$$P_2 = m_2 E_2 I_2 = 6 \frac{E_{g_0} I_g}{1,35 \sqrt{6}} = 1,81 P_g; \quad (\text{XII}, 35)$$

мощность первичной обмотки

$$P_1 = m_1 U_1' I_1' = 3 \frac{E_{g_0} \sqrt{2} I_g}{1,35 \cdot 3} = 1,045 P_g; \quad (\text{XII}, 36)$$

типовая мощность трансформатора

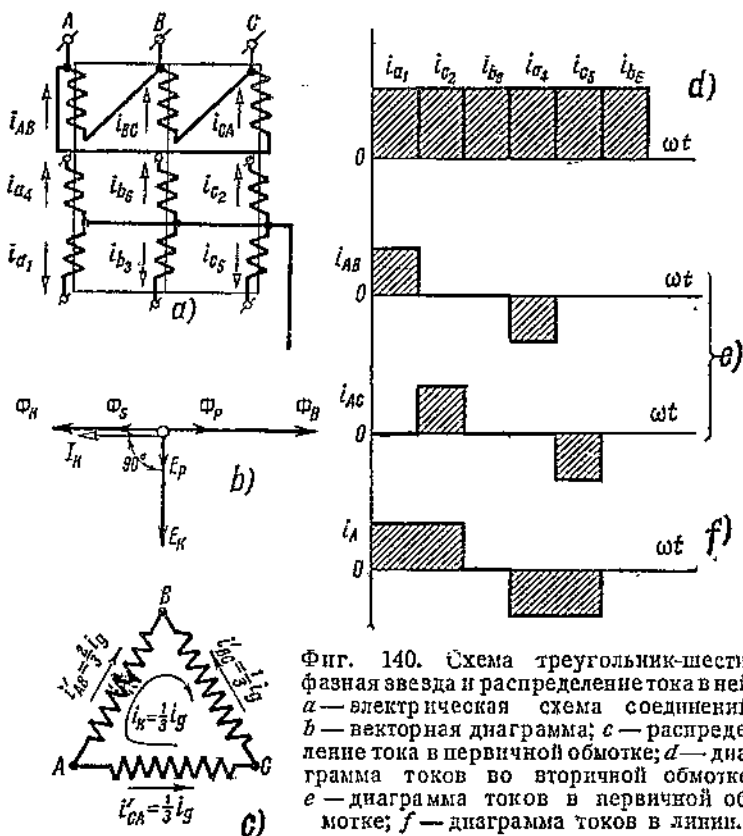
$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} + \frac{1,045 + 1,81}{2} P_g = 1,42 P_g; \quad (\text{XII}, 37)$$

коэффициент мощности

$$\lambda = \frac{P_g}{P_1} = \frac{1}{1,045} = 0,955. \quad (\text{XII}, 38)$$

81. Схема треугольник-шестифазная звезда

Эта схема изображена на фиг. 140, *a*. Режим работы вторичной обмотки в данной схеме остается тем же, что и в предыдущей схеме λf . Каждый из анодов работает в течение $1/6$ части периода (фиг. 140, *d*).



Фиг. 140. Схема треугольник-шести-
фазная звезда и распределение тока в ней.
a — электрическая схема соединений;
b — векторная диаграмма; *c* — распре-
деление тока в первичной обмотке; *d* — диа-
грамма токов во вторичной обмотке;
e — диаграмма токов в первичной об-
мотке; *f* — диаграмма токов в линии.

¹ В тех случаях, когда предварительный расчет показывает, что переход на режим работы, аналогичный описываемому в § 83, имеет место при нагрузках заметно меньше нормальной, расчет мощности производится по формулам (XII, 66), (XII, 68) и (XI, 69).

Для определения первичных токов мы могли бы сохранить в силе всю систему уравнений (XII, 32), если не принимать во внимание токи, которые могут протекать внутри замкнутой на себя первичной обмотки. Действительно, при такой оговорке сумма фазовых токов, равная сумме линейных токов, остается попрежнему равной нулю. Два других уравнения (XII, 2) и (XII, 3) остаются также в силе, поскольку при обходе по магнитным контурам в данной схеме мы встречаемся с теми же токами, что и в схеме звезда-шестифазная звезда. Следовательно, пользуясь одинаковой системой уравнений для определения первичных токов, мы должны получить те же величины токов, как и в схеме λ/λ , т. е. прийти в результате к потоку однофазного намагничивания.

Новым, неучтенным пока, фактором в данной схеме является замкнутая на себя первичная обмотка трансформатора. При изменениях потока однофазного намагничивания в этой обмотке наводится э. д. с. E_k и ток I_k (ток компенсации), поток которого Φ_k противодействует потоку однофазного намагничивания.

Пользуясь для анализа явления методом суперпозиции [Л. XII, 1], мы можем иллюстрировать связь между токами и э. д. с., вызванными потоками однофазного намагничивания векторной диаграммой, представленной на фиг. 140, б.

Φ_B на этой диаграмме есть вектор потока однофазного намагничивания.

E_k представляет собой вектор э. д. с., наводимой потоком Φ_B в первичной обмотке;

I_k — вектор компенсирующего тока, протекающего под действием э. д. с. E_k .

Этот вектор показан на диаграмме отстающим по фазе от вектора E_k на 90° , благодаря тому что мы пренебрегаем омическим падением напряжения в первичной обмотке.

Поток Φ_k , создаваемый током I_k , направлен против потока Φ_B .

В идеальном случае, если первичная обмотка не имела бы рассеяния и омического сопротивления, поток Φ_k был бы почти равен Φ_B и результирующий поток был бы близок к нулю. В этом случае ток I_k был бы очень близок к току, вызвавшему поток однофазного намагничивания, т. е.

$$I_k = \frac{1}{3} i_p.$$

В действительности благодаря наличию омического сопротивления и потока рассеяния Φ_s в первичной обмотке часть потока однофазного намагничивания Φ_p остается нескомпенсированным. Этот результирующий поток Φ_r наводит результирующую э. д. с. E_r , обеспечивающую протекание в первичной обмотке компенсирующего тока I_k . Направление протекания тока i_k в обмотке для той части периода, когда работает анод a_1 , показано на схеме фиг. 140, с. Токи i'_{AB} , i'_{BC} и i'_{CA} , обозначенные на схеме данного рисунка, представляют собой токи, которые мы имели бы в первичной обмотке при работе анодов a_1 без учета тока и потока компенсации.

Полагая для упрощения расчета, что и в реальном случае

$$i_{\kappa} \approx \frac{1}{3} i_g, \quad (\text{XII}, 39)$$

мы получаем, что результирующие токи в первичной обмотке будут равны:

$$\left. \begin{aligned} i_{AB} &= i'_{AB} + i_{\kappa} = \frac{2}{3} i_g + \frac{1}{3} i_g = i_g, \\ i_{BC} &= i'_{BC} - i_{\kappa} = \frac{1}{3} i_g - \frac{1}{3} i_g = 0, \\ i_{CA} &= i'_{CA} - i_{\kappa} = \frac{1}{3} i_g - \frac{1}{3} i_g = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII}, 40)$$

Найденные соотношения для токов показывают, что компенсирующий ток i_{κ} приводит к равновесию м. д. с. на каждом из сердечников трансформатора. В фазе AB первичной обмотки, расположенной на одном сердечнике с нагруженной фазой вторичной обмотки, протекает полный рабочий ток, а в первичных обмотках двух других фаз ток равен нулю. Диаграмма первичных токов для фаз AB и CA при полной компенсации токов дана на фиг. 140, e .

Диаграмма линейного тока для линии A дана на фиг. 140, f .

Эффективное значение „приведенного“ первичного тока на основе диаграммы этого тока равно

$$I_1' = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \frac{2\pi}{3} I_g^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_g. \quad (\text{XII}, 41)$$

Эффективное значение „приведенного“ линейного тока равно

$$I_A = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \frac{4\pi}{3} I_g^2} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_g; \quad (\text{XII}, 42)$$

мощность вторичной обмотки трансформатора

$$P_2 = m_2 E_2 I_2 = 6 \frac{E_{g_0}}{1,35} \frac{I_g}{\sqrt{6}} = 1,81 P_g; \quad (\text{XII}, 43)$$

мощность первичной обмотки трансформатора

$$P_1 = m_1 I_1' U_1' = 3 \frac{I_g}{\sqrt{3}} \frac{E_{g_0}}{1,35} = 1,28 P_g; \quad (\text{XII}, 44)$$

типовая мощность трансформатора

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \left(\frac{1,81 + 1,28}{2} \right) P_g = 1,55 P_g. \quad (\text{XII}, 45)$$

Коэффициент мощности сети мы должны в данном случае определять не

по отношению $\frac{P_g}{P_1}$, а по отношению $\frac{P_g}{P_c}$, где P_c — мощность сети,

$$\lambda = \frac{P_g}{P_c} = \frac{P_g}{V^3} \frac{1,35}{\sqrt{\frac{2}{3} I_g E_{go}}} = 0,955. \quad (\text{XII}, 46)$$

Коэффициенты a и b , определяющие величину A в уравнении (XII, 22) для данной схемы

$$a = \sqrt{3}, \quad b = 1,35.$$

При этом

$$A = \frac{\pi a}{2\pi b} = \frac{6\sqrt{3}}{2\pi 1,35} = 1,23$$

и

$$e_r^0 = A e_k^0 = 1,23 e_k^0.$$

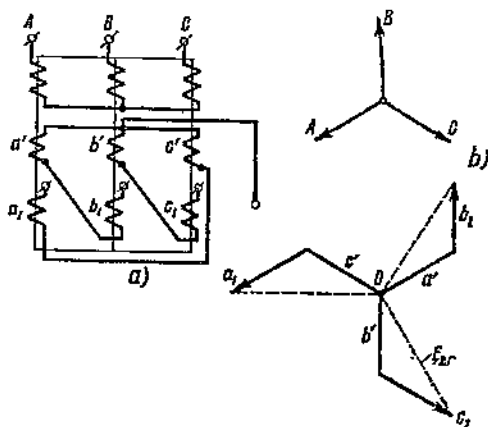
Сравнительную оценку схем мы будем проводить по двум весьма важным параметрам. Одним из них является отношение типовой мощности трансформатора к мощности выпрямленного тока. Другим параметром является коэффициент A .

Численные значения этих параметров в данной схеме больше, чем в других. Этим объясняется то, что схема треугольник-шестифазная звезда находила себе применение только у отдельных фирм (Сименс, Инглиш-Электрик) и притом до тех пор, пока из-за патентных ограничений эти фирмы не могли воспользоваться другими более рациональными схемами.

82. Схема звезда-двойной зигзаг

Эта схема (фиг. 142, а), получившая свое развитие от схемы одиночного зигзага (фиг. 141, а), применявшейся для осветительных трансформаторов, отличается от нее только

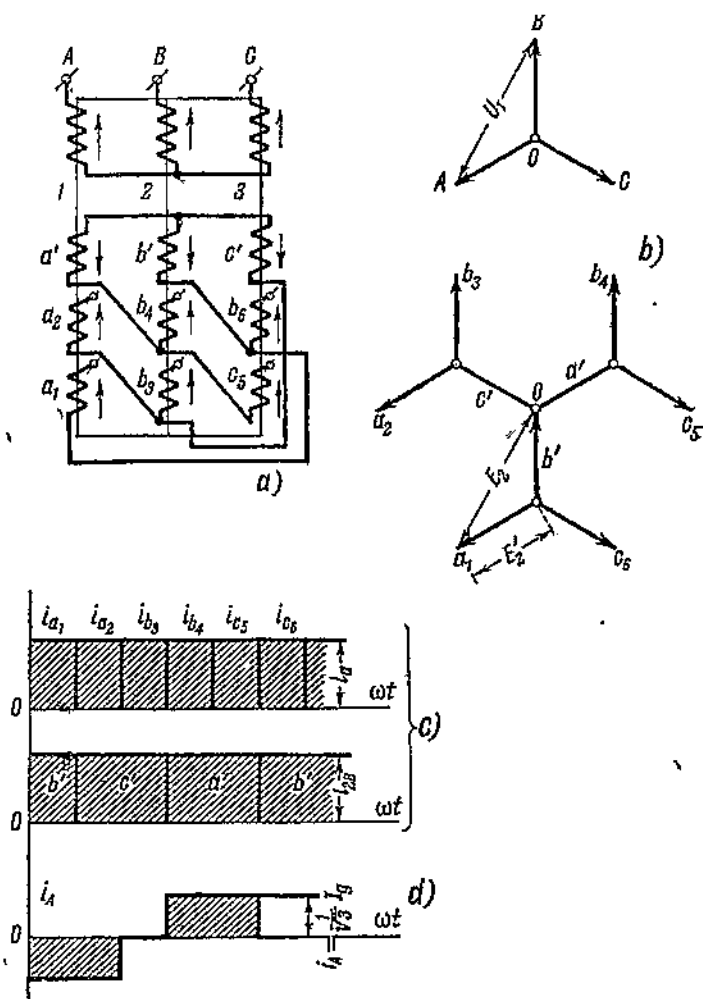
тем, что вторичная обмотка, сидящая на каждом из сердечников, разбита не на две части, а на три части, и к каждой части обмоток (a' , b' и c'), составляющих внутреннюю звезду, присоединено по две ветви, сидящих на двух других сердечниках. В результате вторичная обмотка дает не трехфазную систему, как при одиночном зигзаге (фиг. 141, б), а шестифазную систему (фиг. 142, б). Нумерация анодов на схеме и векторной диаграмме фигуры 142, а и б показывает и тот сердечник, на котором сидит



Фиг. 141. Схема звезда-зигзаг. а — электрическая схема соединений; б — векторная диаграмма напряжений.

обмотка (буквенное обозначение), и последовательность работы фаз (цифровое обозначение).

Преимуществом данной схемы перед ранее рассмотренными является то, что при питании током одного из анодов ток проходит через две



Фиг. 142. Схема звезда-двойной зигзаг. а — электрическая схема соединения; б — векторная диаграмма напряжений; в — токи во внешних и внутренних ветвях; д — токи в первичной обмотке.

вторичных обмотки, сидящих на разных сердечниках. Это обуславливает, как видно из нижеследующих уравнений, полную компенсацию ампервитков на каждом сердечнике трансформатора.

Действительно, составляя систему уравнений для определения первичных токов в ту часть периода, когда ток проходит через 1-ый анод,

и предполагая, что число витков первичной обмотки равно числу витков в каждой из ветвей вторичной обмотки, мы имеем по первому закону Кирхгофа для первичной обмотки

$$i_A + i_B + i_G = 0. \quad (\text{XII}, 47)$$

По второму закону Кирхгофа для магнитных контуров:

а) для контура, включающего сердечники 1 и 2,

$$i_A - i_B + 2 i_g = 0; \quad (\text{XII}, 48)$$

б) для контура, включающего сердечники 2 и 3,

$$i_B - i_G - i_g = 0. \quad (\text{XII}, 49)$$

Решая совместно эти уравнения, получаем

$$\left. \begin{aligned} i_A &= -i_g, \\ i_B &= i_g, \\ i_G &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII}, 50)$$

Таким образом на каждом из сердечников получается полная компенсация ампервитков.

Диаграмма токов во внешних и внутренних ветвях вторичной обмотки приведена для этой схемы на фиг. 142, с.

Действующее значение тока в внешней ветви является здесь таким же, как и в нормальной шестифазной схеме, т. е.

$$I_2 = I_a = \frac{I_g}{\sqrt{6}}. \quad (\text{XII}, 51)$$

Действующее значение тока во внутренней ветви, через которую ток проходит в течение $1/3$ периода, поскольку каждая внутренняя ветвь питает током две внешних ветви, будет равно

$$I_{2g} = \frac{I_g}{3}. \quad (\text{XII}, 52)$$

Полное фазовое напряжение вторичной обмотки в данной схеме находится в том же соотношении к выпрямленному напряжению, как и в нормальной шестифазной схеме, т. е.

$$E_2 = \frac{E_{g0}}{1,35}. \quad (\text{XII}, 53)$$

Напряжение одной ветви обмотки

$$E_2' = \frac{E_2}{1,73} = \frac{E_{g0}}{1,73 \cdot 1,35} = \frac{E_{g0}}{2,34}; \quad (\text{XII}, 54)$$

расчетная мощность вторичной обмотки трансформатора

$$P_2 = 6 E_2' I_2 + 3 E_2' I_{2g}' = 6 \frac{E_{g0}}{2,34} \frac{I_g}{\sqrt{6}} + 3 \frac{E_{g0}}{2,34} \frac{I_g}{3} = 1,79 P_g. \quad (\text{XII}, 55)$$

Ток в первичной обмотке той или иной фазы проходит тогда, когда нагружены током вторичные обмотки, расположенные на том же сердечнике. Это значит, что ток в фазе A , диаграмма которого дана на фиг. 142, c , проходит тогда, когда имеется ток в частях обмоток a' , a_1 и a_2 . При этом в соответствии с обозначенным на схеме положительным направлением для токов ток в ветви a' отвечает положительное направление тока в фазе A , а токам в ветвях a_1 и a_2 — отрицательное направление тока в фазе A . Величина амплитуды первичных токов на диаграмме фиг. 142, d , показана равной $\frac{1}{\sqrt{3}}$ от амплитуды вторичных то-

ков, поскольку при составлении уравнений для первичных токов мы приняли, что число витков первичной обмотки равно числу витков в одной ветви вторичной обмотки, в то время как фактически, сохраняя принятое определение коэффициента трансформации, как отношение $k = \frac{U_1}{E_2}$, мы должны считать коэффициент трансформации по отношению к одной части обмотки равным $\sqrt{3}$.

Действующее значение приведенного первичного тока равно в этом случае

$$I_1' = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \frac{4\pi}{3} \left(\frac{I_g}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_g, \quad (\text{XII}, 56)$$

расчетная первичная мощность трансформатора

$$P_1 = m_1 U_1' I_1' = 3 \frac{E_{g0}}{1,35} \frac{\sqrt{2}}{3} I_g = 1,05 P_g; \quad (\text{XII}, 57)$$

типовая мощность трансформатора

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{1,05 + 1,79}{2} P_g = 1,42 P_g; \quad (\text{XII}, 58)$$

коэффициент мощности

$$\lambda = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{1,05} = 0,955. \quad (\text{XII}, 59)$$

При определении падения напряжения, вызванного реактивностью трансформатора, мы должны в этой схеме учитывать индуктивность не всей вторичной обмотки трансформатора, состоящей из двух последовательно соединенных ветвей, а только индуктивность одной ветви. Это обусловлено тем, что при переходе тока от одного анода к другому не вся индуктивность фазы вторичной обмотки участвует в процессе коммутации тока, а только индуктивность одной ветви. Действительно, при переходе тока от одной внешней ветви к другой, если они присоединены к общей внутренней ветви, ток во внутренней ветви остается без изменения, и потому поток рассеяния этой ветви в создании э. д. с. самоиндукции не участвует. При переходе тока к следующему аноду ток и создаваемый им поток рассеяния меняются во внутренней ветви, во внешних же ветвях, сидящих на одном сердечнике, общий поток

рассеяния не меняется, поскольку убыль потока рассеяния в одной внешней ветви компенсируется усилением потока в другой ветви¹.

Так как реактанс пропорционален квадрату числа витков и, следовательно, квадрату напряжения, то реактанс каждой ветви обмотки X_a' , имеющей напряжение $\frac{E_a}{\sqrt{3}}$, равен

$$X_a' = \left(\frac{E_a}{\sqrt{3}} \right)^2 X_a = \frac{X_a}{3}. \quad (\text{XII}, 60)$$

В этом случае формула (XII, 20'), определяющая индуктивное падение напряжения на стороне выпрямленного тока, заменяется формулой

$$e_r = \frac{m I_g X_a}{2 \pi \beta}. \quad (\text{XII}, 61)$$

Значение коэффициента A для данной схемы, имея в виду, что по формулам (XII, 56) и (XII, 53)

$$a = \frac{3}{\sqrt{2}} \text{ и } b = 1,35,$$

будет равно

$$A = \frac{ma}{2\pi\beta b} = \frac{6 \cdot 3}{\sqrt{2} \cdot 2\pi \cdot 1,35} = 0,5.$$

Тогда

$$e_r^0 / e_0 = 0,5 e_r^0 / e_0.$$

Коэффициент A и величина типовой мощности трансформатора при схеме с двойным зигзагом показывают, что эта схема является значительно более рациональной, чем ранее рассмотренные.

83. Схема звезда-двойная звезда с однофазным дросселем

В этой схеме шесть фаз вторичной обмотки, как показывает фиг. 143, a , связаны в две самостоятельные трехфазные звезды, между нулевыми точками которых O_1 и O_2 включен однофазный дроссель с железным сердечником, названный по имени автора этой схемы катушкой Кюблера. Одна из трехфазных звезд питает четную группу анодов, а другая — четную группу анодов. Середина катушки O служит отрицательным полюсом для цепи выпрямленного тока.

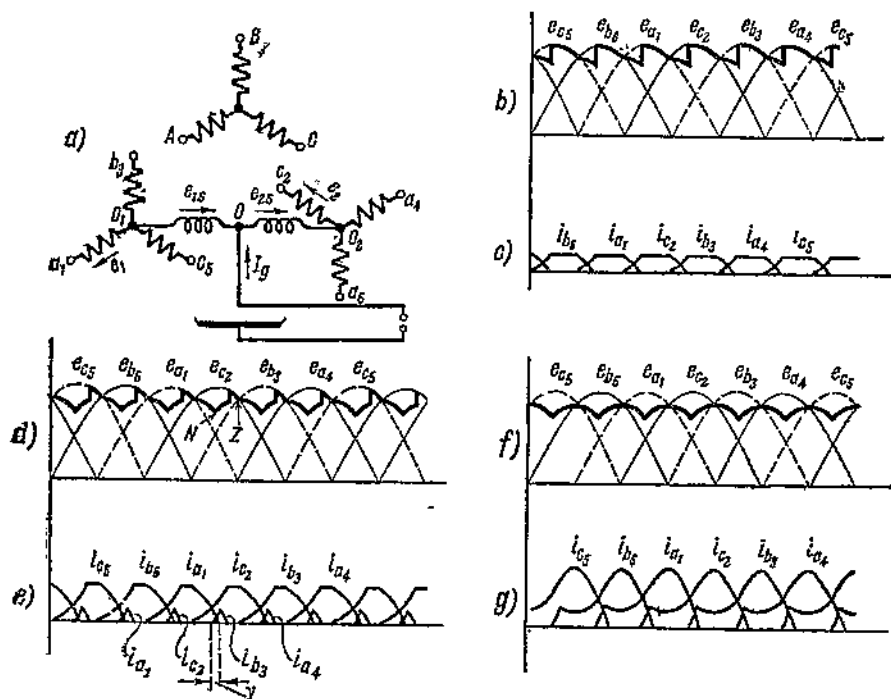
Цель введения катушки в схему заключается в том, чтобы получить одновременную работу двух анодов (четной и нечетной групп), питающие обмотки которых расположены на двух разных сердечниках. Таким путем, как и при зигзаге, мы добиваемся полной компенсации ампер-витков первичной и вторичной обмоток на каждом из сердечников и предупреждаем тем самым образование потока вынужденного намагничивания.

Одновременная работа двух анодов (четной и нечетной групп) достигается здесь за счет э. д. с. самоиндукции, возникающей в ветвях

¹ Эти ветви при практическом выполнении трансформаторов вмотаны друг в друга.

катушки, выравнивающей в каждый данный момент напряжения двух чередующихся фаз [Л. XII, 1].

Работа катушки как полноценного „уравнителя напряжения“ начинается только после того, как выпрямленный ток достигнет определенного минимального значения (называемого критическим током $I_{гкр}$). Пока ток $I_g < I_{гкр}$, катушка работает как простая индуктивность, вызывая лишь добавочное индуктивное падение напряжения. Этот режим работы иллюстрируют диаграммы тока и напряжения на фиг. 143. На фиг. 143, *b* и *c* показаны кривые напряжения и тока при начальных



Фиг. 143. Схема звезда-двойная звезда с однофазным дросселем. *a* — электрическая схема соединений; *b* и *c* — диаграммы напряжений и токов при $I_g \ll I_{гкр}$; *d* и *e* — то же при $I_g < I_{гкр}$; *f* и *g* — то же при $I_g > I_{гкр}$.

значениях тока, когда I_g меньше $I_{гкр}$. Отличие работы рассматриваемой схемы на данном режиме нагрузки от работы схемы без катушки, рассмотренной в § 79, заключается лишь в том, что периоды перекрытия здесь значительно больше из-за добавленной в цепи фаз трансформатора индуктивности самой катушки.

На диаграммах фиг. 143, *d* и *e* показана следующая характерная стадия нагрузки, когда I_g продолжает еще быть меньше $I_{гкр}$, но период перекрытия (вследствие роста тока) затянулся уже настолько, что достигнута точка *N* (фиг. 143, *d*), а ток в заканчивающем свою работу аноде еще не упал до нуля. Точка *N* является характерной для данной схемы в том отношении, что в момент, ей соответствующий, имеет

место равенство напряжений двух чередующихся фаз одной и той же трехфазной группы. В этой точке ток заканчивающего свою работу анода должен перейти к следующему аноду своей же группы, так как э. д. с. самоиндукции, возникающая на концах катушки Кюблера, добавляется одновременно (см. схему на фиг. 143, *а*) ко всем фазовым напряжениям данной трехфазной группы.

Так, в точке *N* ток переходит от первого анода к третьему, сменяющему таким образом анод первый в его одновременной работе со вторым анодом.

Переход тока от первого анода к третьему, совершается не мгновенно, а в течение известного промежутка времени измеряемого угла перекрытия γ , который, впрочем, относительно мал, поскольку индуктивность трансформатора, определяющая этот угол перекрытия, относительно также мала.

В течение этого короткого периода перекрытия ток первого анода падает до нуля, а ток третьего анода возрастает до значения, какое имел ток первого анода в момент, соответствующий точке *N*. В результате такого перехода дуга на третьем аноде зажигается с опережением на 30° против точки ее естественного зажигания (точка *Z* на фиг. 143, *а*). Ток, перешедший от первого анода к третьему аноду, после точки *N* продолжает уменьшаться, создавая тем самым нужную для обеспечения одновременной работы со вторым анодом э. д. с. самоиндукции.

Фиг. 143, *д* и *е* соответствуют случаю, когда ток вступившего с опережением в работу анода падает к нулю, не достигнув еще точки своего естественного зажигания (для третьего анода точка *Z*). В этом случае третий анод зажигается в точке *Z* снова. В этом случае в кривых анодных токов, как видно из фиг. 143, *е*, имеются разрывы.

Следующую характерную стадию дают диаграммы фиг. 143, *г* и *з*, соответствующие режиму нагрузки, когда I_g стало больше $I_{гкр}$. Последнее характеризуется тем, что в кривой анодного тока разрывы исчезают, так как зажигающийся с опережением на 30° анод продолжает работу до точки своего естественного зажигания, начиная с которой ток в данном аноде продолжает поддерживаться за счет напряжения своей же фазы трансформатора.

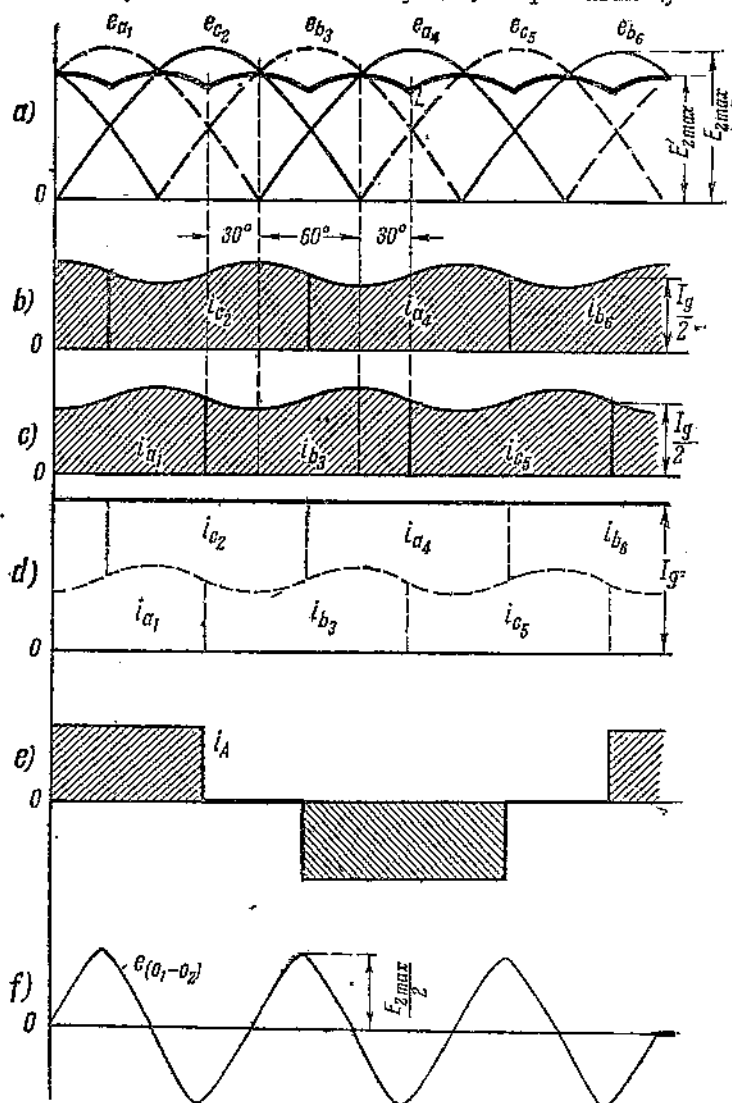
Начиная с $I_g = I_{гкр}$, мы получаем, что кривая выпрямленного напряжения проходит непрерывно посередине между кривыми фазовых напряжений четной и нечетной групп и два анода разных групп, чередуясь, работают все время параллельно.

Диаграммы напряжений и токов для нормального режима работы повторены на диаграммах фиг. 144, на которой токи обеих групп анодов показаны отдельно (фиг. 144, *б* и *с*). Кроме того, на этом рисунке даны кривая выпрямленного тока (фиг. 144, *д*), кривая тока в одной из фаз первичной обмотки (фиг. 144, *е*) и, наконец, кривая напряжений на концах катушки Кюблера (фиг. 144, *ф*).

Периодом коммутации, вызванным индуктивностью трансформаторных обмоток, мы на этих диаграммах пренебрегаем.

Рассматривая кривую тока какого-либо анода, скажем, третьего, на диаграмме фиг. 144, мы видим, что ток у данного анода, вступившего в работу с опережением на 30° ($1/12$ периода), вначале в течение пер-

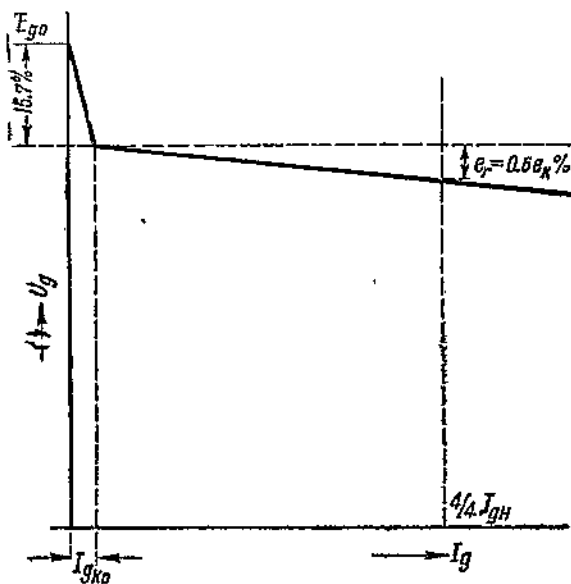
вой двенадцатой части периода идет на снижение, создавая тем самым в левой ветви катушки э. д. с. самоиндукции, выравнивающую напря-



Фиг. 144. *a* — диаграмма напряжений и токов в схеме звезда-двойная звезда с однофазным дросселем при нормальной работе; *b* — токи в ветвях звезды, питающих четную группу анодов; *c* — токи в ветвях звезды, питающих нечетную группу анодов; *d* — выпрямленный ток; *e* — первичный ток; *f* — напряжение на клеммах катушки Кублера.

жение данного анода до среднего значения напряжения. Ток второго анода идет в это время на повышение, вызывая э. д. с. самоиндукции,

наводимой им в катушке, понижающую его фазовое напряжение также до среднего значения. В течение следующей шестой части периода, поскольку фазовое напряжение третьего анода проходит выше среднего значения напряжения, ток этого анода идет на повышение, вызывая в левой ветви катушки э. д. с. самоиндукции, вычитающуюся из фазового напряжения; кривые тока анода второго, а затем и четвертого анода идут в это время на понижение, создавая в правой ветви катушки э. д. с. самоиндукции, повышающую их фазовые напряжения до среднего значения. Наконец, в последнюю двенадцатую периода, на которую благодаря катушке затягивается период работы анода против



Фиг. 145. Внешняя характеристика при схеме с однофазным дросселем.

Такой режим работы обеспечивает схеме целый ряд преимуществ, а именно:

- 1) предупреждает образование потока вынужденного намагничивания благодаря одновременной работе двух анодов;
- 2) дает лучшее использование трансформатора благодаря переходу от шестифазного режима к трехфазному;
- 3) повышает нагрузочную способность выпрямителя благодаря меньшим значениям амплитуды и действующего значения анодного тока;
- 4) заметно уменьшает индуктивное падение напряжения при нагрузке благодаря меньшей амплитуде анодного тока и меньшему числу фаз, входящих в формулу (XII, 20').

При этом кривая выпрямленного напряжения сохраняет шестифазные пульсации, несмотря на то, что анодные токи имеют трехфазный режим.

Амплитуда кривой переменного напряжения при вступлении катушки в действие как уравнивателя снижается, как это видно из диаграммы на-

ormalного, ток третьего анода идет опять на снижение, создавая э. д. с. самоиндукции; добавляющуюся к фазовому напряжению данного анода. Затем в точке L ток переходит от третьего анода к пятому и т. д. Так протекает работа каждого из анодов четной и нечетной групп.

Действие катушки приводит, таким образом, к тому, что каждый из анодов данной схемы работает не в течение $\frac{1}{6}$ периода, а в течение $\frac{1}{3}$ периода, причем полный ток нагрузки распределяется между двумя параллельно работающими анодами.

пряжения (фиг. 144, а), до величины

$$E_2'_{\max} = E_{2\max} \cos 30^\circ = 0,865 E_{\max}. \quad (\text{XII}, 62)$$

Это создает скачок напряжения во внешней характеристике (фиг. 145) при разгрузке выпрямителя от критического тока $I_{g\text{кр}}$ до холостого хода равный

$$\alpha\% = \frac{1 - 0,865}{0,865} 100 = 15,7\%. \quad (\text{XII}, 63)$$

Последнее является известным недостатком данной схемы.

Кривые анодных токов содержат, как это видно из диаграмм, помимо постоянной составляющей, равной $\frac{I_g}{2}$, еще переменную составляющую 3-кратной периодичности, определяемую током намагничивания катушки.

В состав полного тока I_g эта составляющая не входит (фиг. 144, д), поскольку фазы этой составляющей в обеих группах анодов противоположны. Обычно катушка рассчитывается таким образом, чтобы ток $I_{g\text{кр}}$, определяемый током намагничивания, не превосходил 1—2% от рабочего тока.

В этом случае переменной составляющей тока можно при расчете пренебречь и считать, что ток во вторичной обмотке трансформатора

$$I_2 = \frac{I_g}{2\sqrt{3}}. \quad (\text{XII}, 64)$$

Поскольку кривая напряжения при нормальной нагрузке остается такой же, как и при шестифазном выпрямлении, то вторичное напряжение сохраняет установленную ранее (II, 28) связь с E_{g0}

$$E_2' = \frac{E_{g0}}{1,35}. \quad (\text{XII}, 65)$$

При холостом ходе это напряжение повышается до

$$E_2 = \frac{E_2'}{\cos 30^\circ} = \frac{2E_{g0}}{1,35\sqrt{3}} = \frac{E_{g0}}{1,17}. \quad (\text{XII}, 62')$$

Расчетная мощность вторичной обмотки трансформатора равна при этих условиях

$$P_2 = 6E_2I_2 = 6 \cdot \frac{2E_{g0}}{1,35\sqrt{3}} \cdot \frac{I_g}{2\sqrt{3}} = 1,48P_g. \quad (\text{XII}, 66)$$

Диаграмма первичного тока, построенного для фазы А на основе того, что ток в первичной обмотке равен току во вторичных обмотках той же фазы, показана на фиг. 144, е.

Действующее значение приведенного первичного тока, определенного по линейной диаграмме фиг. 144, е, равно

$$I_1' = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \frac{4\pi}{3} \left(\frac{I_g}{2}\right)^2} = \frac{I_g}{\sqrt{6}}; \quad (\text{XII}, 67)$$

мощность первичной обмотки

$$P_1 = m I_1' U_1' = 3 \frac{I_g}{\sqrt{6}} \frac{2E_g}{1,35 \sqrt{3}} = 1,047 P_g; \quad (\text{XII}, 68)$$

типовая мощность трансформатора

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{1,047 + 1,481}{2} P_g = 1,264 P_g; \quad (\text{XII}, 69)$$

коэффициент мощности

$$\lambda = \frac{1}{1,047} = 0,955. \quad (\text{XII}, 70)$$

Типовая мощность катушки Кюблера определяется полупроизведением из тока на напряжение, поскольку катушка имеет только одну обмотку

$$P_{\pi} = \frac{E_{\pi} I_{\pi}}{2}. \quad (\text{XII}, 71)$$

Ток, проходящий по ветвям катушки, равен половине выпрямленного тока

$$I_{\pi} = \frac{I_g}{2}. \quad (\text{XII}, 72)$$

Напряжение, приходящееся на катушку, равно разности фазовых напряжений чередующихся фаз. Кривая этой разности показана на фиг. 144, *г*. При пересчете треугольной формы кривой напряжения на эквивалентную синусоиду эффективное значение этого напряжения

$$E'_{\pi} \approx 0,5 E_2. \quad (\text{XII}, 73)$$

Это напряжение имеет тройную частоту. Определяя размеры катушки по нормальной частоте, мы должны предварительно найти то напряжение, которое является расчетным при нормальной частоте, учитывая при этом и изменение напряжения вследствие изменения частоты и изменение напряжения вследствие изменения индукции в железе (в связи с необходимостью потери в железе при нормальной и повышенной частоте сохранить одинаковыми). Последнее условие определяет [Л. XII, I]

$$kB_1^{1,6} f_1 = kB_3^{1,6} 3f_1, \quad (\text{XII}, 74)$$

откуда

$$\frac{B_3}{B_1} = \sqrt[1,6]{\frac{1}{3}} = 0,5,$$

т. е. при переходе на тройную частоту мы должны индукцию снизить в два раза.

Следовательно, расчетное напряжение при нормальной частоте должно вследствие снижения частоты уменьшиться в три раза, а вследствие повышения индукции повыситься в два раза; в результате расчет-

ное напряжение при нормальной частоте составляет $\frac{2}{3}$ от напряжения при тройной частоте

$$E_{\kappa} = \frac{2}{3} E'_{\kappa} = \frac{1}{3} E_2 = \frac{2E_{g0}}{3 \cdot 1,35 \cdot \sqrt{3}}. \quad (\text{XII}, 75)$$

Таким образом окончательная величина расчетной мощности катушки равна

$$P_{\kappa} = \frac{E_{\kappa} I_{\kappa}}{2} = \frac{2E_{g0} I_g}{3 \cdot 1,35 \cdot \sqrt{3} \cdot 4} = 0,071 P_g, \quad (\text{XII}, 76)$$

т. е. составляет 7,1% от мощности выпрямленного тока.

Индуктивность катушки может быть рассчитана по индуктируемому ею напряжению E_{κ} и амплитуде тока холостого хода $I_{0\max}$, которая должна быть равна половине $I_{g\kappa p}$, поскольку выпрямленный ток расходится по двум параллельным ветвям катушки.

Так как

$$I_{g\kappa p} = \frac{p^0}{100} I_g,$$

где p^0 определяет собой расчетный процент критического тока по отношению к полному току нагрузки, то ток $I_{0\max}$ будет равен

$$I_{0\max} = \frac{I_{g\kappa p}}{2} = \frac{p^0}{200} I_g, \quad (\text{XII}, 77)$$

а индуктивность катушки, учитывая тройную частоту потока, будет

$$L = \frac{E_{\kappa}}{3\omega I_0} = \frac{0,5E_2\sqrt{2}}{3\omega I_{0\max}} = \frac{47}{\omega p^0} \frac{E_2}{I_g}. \quad (\text{XII}, 78)$$

Формула (XII, 20'), определяющая индуктивное падение напряжения в выпрямительной установке, должна быть здесь заменена формулой

$$e_r = \frac{m I_g X_a}{2 \cdot 2\pi}, \quad (\text{XII}, 20'')$$

поскольку коммутируемый анодный ток в этой схеме равен $\frac{I_g}{2}$.

Значение коэффициента A для данной схемы, имея в виду, что по формулам (XII, 62' и XII, 67)

$$a = \sqrt{6}, \quad b = 1,17 \quad \text{и что } m = 3,$$

будет равно

$$A = \frac{ma}{2\pi \cdot 2 \cdot b} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi \cdot 2 \cdot 1,17} = 0,5.$$

Тогда

$$e_r^0 = 0,5 e_{\kappa}^0 \quad (\text{XII}, 79)$$

$$U_g = E_{g0} \left(1 - 0,5 \frac{e_{\kappa}^0}{100} \right). \quad (\text{XII}, 80)$$

Такое падение напряжения мы имеем при изменении тока от полной нагрузки до критического значения тока. При полной разгрузке выпрямителя до холостого хода происходит дополнительный скачок напряжения, определяемый нами по формуле (XII, 63) 15,7%.

В последнее время предложен ряд схем для устранения пика напряжения при переходе к холостому ходу выпрямителя. Одной из них является схема питания дроссельной катушки токами тройной частоты, получаемыми от постороннего источника тока.

Пример. Трансформатор, соединенный по схеме звезда-двойная звезда с катушкой Кюблера, питает выпрямительную установку мощностью 2 400 kW при напряжении выпрямленного тока 3 300 V. Найти токи во всех элементах установки, мощность трансформатора и катушки Кюблера, а также к. п. д. установки и падение напряжения при полной нагрузке выпрямителя.

Трансформатор питается от сети с напряжением 33 000 V и имеет следующие данные; $e_{\kappa}^0 = 8\%$; потери в железе $P_{\text{ж}} = 0,75\%$ от P_g и потери в меди $P_{\text{м}} = 1,33\%$ от P_g .

Определяем: 1. Выпрямленный ток

$$I_g = \frac{P_g}{U_g} = \frac{2\,400 \cdot 1\,000}{3\,300} = 727 \text{ A};$$

2. Выпрямленное напряжение при критическом токе при учете омического падения напряжения в обмотке трансформатора $e_{\text{м}}$, индуктивного падения напряжения e_r и падения в дуге ΔU_g равно

$$U_g' = U_g + \Delta U_g + e_r + e_{\text{м}}.$$

Индуктивное падение напряжения e_r определяется по формуле (XII, 79)

$$e_r = 0,5 \frac{e_{\kappa}^0}{100} E_{g0} \approx 0,5 \frac{e_{\kappa}^0}{100} U_g = 0,5 \frac{8}{100} 3\,300 = 132 \text{ V}.$$

Омическое падение напряжения $e_{\text{м}}$ определяем по процентной величине потерь в меди трансформатора

$$e_{\text{м}} = \frac{P_{\text{м}}^0}{100 I_g} = \frac{1,33 \cdot 2\,400 \cdot 1\,000}{100 \cdot 727} = 44 \text{ V}.$$

Падение в дуге выпрямителя ΔU_g принимаем равным 25 V.

Тогда

$$U_g' = 3\,300 + 25 + 132 + 44 = 3\,500 \text{ V}.$$

При холостом ходе выпрямленное напряжение возрастает согласно формуле (XII, 62) до

$$E_{g0} = \frac{U_g'}{0,865} = \frac{3\,500}{0,865} = 4\,050 \text{ V}.$$

3. Вторичное фазовое напряжение определяем по формуле (XII,65)

$$E_2 = \frac{E_{r2}}{1,35} = \frac{4\,050}{1,35} = 3\,000 \text{ V.}$$

4. Первичное фазовое напряжение равно

$$U_1 = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{33\,000}{\sqrt{3}} = 19\,050 \text{ V.}$$

5. Коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_1}{E_2} = \frac{19\,050}{3\,000} = 6,35.$$

6. Эффективное значение анодного тока или тока вторичной обмотки трансформатора определяем по формуле (XII, 64)

$$I_2 = \frac{I_g}{2\sqrt{3}} = \frac{727}{3,46} = 210 \text{ A.}$$

7. Эффективное значение первичного тока по формуле (XII,67)

$$I_1 = \frac{1}{k} \frac{I_g}{\sqrt{6}} = \frac{727}{6,35 \cdot \sqrt{6}} = 47 \text{ A.}$$

8. Мощность вторичной обмотки трансформатора с учетом потерь в меди будет равна

$$P_2 = (1,48 + 0,013) P_g = 1,493 P_g = 1,493 \cdot 2\,400 = 3\,570 \text{ kW.}$$

9. Мощность первичной обмотки с учетом потерь в меди и железе будет равна

$$P_1 = (1,05 + 0,02) P_g = 1,07 \cdot 2\,400 = 2\,560 \text{ kW.}$$

10. Типовая мощность трансформатора

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{3\,570 + 2\,560}{2} = 3\,065 \text{ kW.}$$

11. Типовая мощность катушки Кюблера

$$P_k = 0,071 P_g = 0,071 \cdot 2\,400 \approx 170 \text{ kW.}$$

12. Критический ток оцениваем в 10% от тока при полной нагрузке

$$I_{g\text{кр}} = 0,01 \cdot 727 = 7,27 \text{ A,}$$

при этом токе устанавливается нормальный режим работы катушки.

13. Индуктивность катушки Кюблера определяется по формуле (XII, 78)

$$L = \frac{47}{\omega p^0_0} \frac{E_2}{I_g} = \frac{47 \cdot 3\,000}{314 \cdot 7,27} = 61,9 \text{ H.}$$

14. Коэффициент мощности без учета реактивной мощности при холостом ходе

$$\lambda = \frac{P_g}{P_1} = \frac{2400}{2560} = 0,9.$$

15. Коэффициент полезного действия установки η определяется произведением к. п. д. выпрямителя и трансформатора

$$\eta = \eta_s \eta_{mp},$$

$$\eta_s = \frac{3300 \cdot 100}{3300 + 25} = 99,3\%,$$

$$\eta_{mp} = \frac{P_g}{P_g + P_{\text{л}} + P_{\text{ю}}} = \frac{2400 \cdot 100}{2400 + 31 \cdot 9 + 18} = 98\%.$$

Общий к. п. д.

$$\eta = 99,3 \cdot 0,98 = 97,4\%.$$

84. Соотношения токов и напряжений в управляемом сетками ртутном выпрямителе

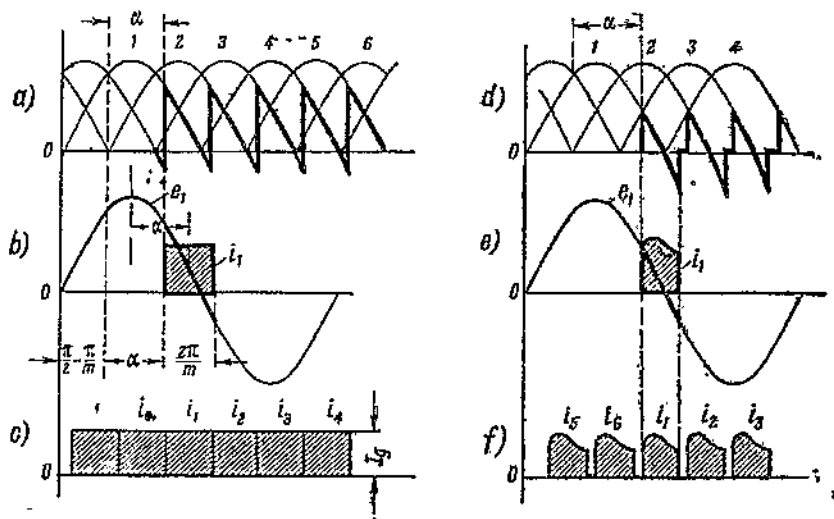
В регулируемом сетками ртутном выпрямителе зажигание очередного анода происходит, как мы видели, не в точке естественного зажигания анода, а спустя промежуток времени, измеряемый углом регулирования α (см. диаграммы на фиг. 88).

Среднее значение выпрямленного напряжения для того случая, когда анод сохраняет нормальную продолжительность горения, было нами выведено в § 52 [см. формулу (VIII, 4')].

Нормальную продолжительность горения анодов $\frac{2\pi}{m}$ мы получаем тогда, когда индуктивность в цепи выпрямленного тока достаточно велика, чтобы в случае перехода горения анода при больших углах α в отрицательную часть периода (фиг. 146, *a* и *b*) дать нужную э. д. с. самоиндукции для компенсации отрицательного фазового напряжения и покрытия падения напряжения в дуге. Кривая выпрямленного тока получается в этом случае непрерывной и изображена на фиг. 146, *c* в виде прямой, параллельной оси абсцисс, поскольку предполагается, что индуктивность настолько велика, что гармонические выпрямленного тока ничтожно малы.

Если запасенная в катушке Кюблера магнитная энергия недостаточна, чтобы поддержать горение анода в течение той части периода, когда в цепи действует отрицательное напряжение фазы, то анод гаснет до истечения периода нормальной продолжительности горения анода (измеряемого углом $\frac{2\pi}{m}$) и кривая выпрямленного тока получается прерывистой (фиг. 146, *f*). Это может иметь место или в том случае, когда индуктивность в цепи выпрямленного тока недостаточна, или же, когда угол регулирования α слишком велик (фиг. 146, *d* и *e*).

При установившемся режиме работы продолжительность горения анода при отрицательной полуволне напряжения в нормальных схемах не может быть больше горения анода при положительной полуволне, так как при отрицательной полуволне работа происходит только за счет энергии, которая накоплена индуктивностью в положительную полуволну напряжения. Поэтому максимальным углом регулирования при непрерывной кривой выпрямленного тока при наличии даже бесконечной индуктивности цепи (идеальный случай) является угол $\alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$, отсчитываемый от точки естественного зажигания анода.



Фиг. 146. Кривые токов и напряжений в регулируемом сетками ртутном выпрямителе. *a, b и c* — при непрерывной кривой выпрямленного тока; *d, e и f* — при прерывающейся кривой выпрямленного тока.

При чисто омическом сопротивлении в цепи горение анода прекращается в точке перехода положительной полуволны напряжения через нуль. Поэтому максимальным углом регулирования, при котором ток начинает прерываться (фиг. 146, *b*) при отсутствии индуктивности в цепи выпрямленного тока, является угол [Л. XII, 15]

$$\alpha = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right) = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}. \quad (\text{XII}, 81)$$

Значения этого угла, подсчитанные для разного числа фаз трансформатора, даны в табл. 29 (стр. 226).

При конечной величине индуктивности, включенной в цепь выпрямленного тока, углы регулирования, при которых начинаются разрывы, в кривой тока изменяются в пределах от указанных в таблице значений углов до угла $\alpha = 90^\circ$.

Среднее значение кривой выпрямленного напряжения при отсутствии разрывов кривой тока была нами определена формулой (VIII, 4')

$$E_g = E_{g0} \cos \alpha.$$

ТАБЛИЦА 29

Предельные углы регулирования α , при которых начинаются разрывы в кривой тока, при чисто омическом сопротивлении в цепи выпрямленного тока

m	2	3	6	12
α	0°	30°	60°	75°

При наличии разрывов в кривой тока при чисто омическом сопротивлении в цепи среднее значение выпрямленного напряжения определяется формулой

$$E_g = \frac{m}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{+\frac{\pi}{2}} \sqrt{2} E_g \cos x \, dx = \frac{m}{2\pi} \sqrt{2} E_g \left[1 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right) \right]. \quad (\text{XII}, 82)$$

Отношение регулируемого напряжения к напряжению холостого хода у нерегулируемого выпрямителя в этом случае равно

$$\frac{E_g}{E_{g0}} = \frac{1 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right)}{2 \sin \frac{\pi}{m}}. \quad (\text{XII}, 82')$$

Кривые напряжения в зависимости от угла регулирования (регулируемые характеристики) для различного числа фаз при чисто омическом сопротивлении в цепи даны на фиг. 147 [Л. XII, 15].

При точной фиксации момента зажигания анодов регулировочные характеристики, получаемые из опыта, близко совпадают с теоретическими.

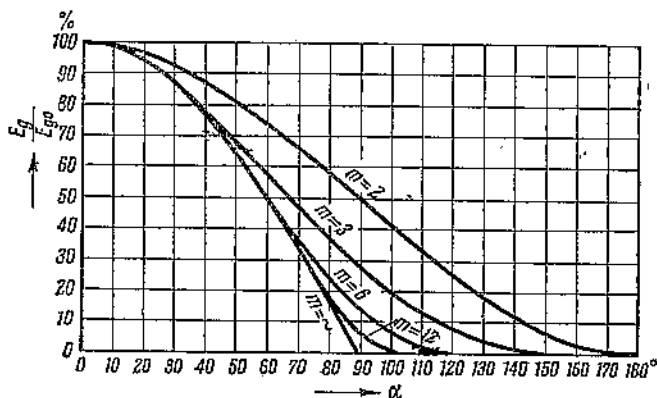
Среднее и действующее значения выпрямленного тока и анодных токов при сеточном регулировании и при чисто омическом сопротивлении мы можем определить по среднему и действующему значению выпрямленного напряжения, пользуясь законом Ома.

При наличии индуктивности в цепи выпрямленного тока среднее и действующее значения для токов мы можем определить по отдельным гармоническим составляющим путем разложения кривой выпрямленного напряжения в ряд Фурье (§ 85).

Метод определения токов первичной обмотки, мощности трансформатора и коэффициента мощности сети остается здесь таким же, каким мы пользовались при определении соответствующих величин в схемах без сеточного регулирования [Л. XII, 5].

Поскольку при задержке зажигания очередного анода на угол α , ось симметрии кривой анодного тока смещается на тот же угол α по отношению к оси кривой напряжения соответствующей фазы (фиг. 146, б), то коэффициент сдвига, входящий множителем в выражение коэффициента мощности [см. уравнение (XII, 10)], равен косинусу угла регулирования: $\cos \varphi = \cos \alpha$. Это показывает, что при сеточном регулировании коэффициент мощности снижается пропорционально уменьшению регулируемого напряжения, что является одним из основных недостатков сеточного регулирования.

Известное смягчение этого недостатка мы получаем в схеме, изображенной на фиг. 148, а, описанной ниж. Ульманом [Л. XII, 8] и предложенной независимо от него ниж. Г. И. Бабат [Л. XII, 28].



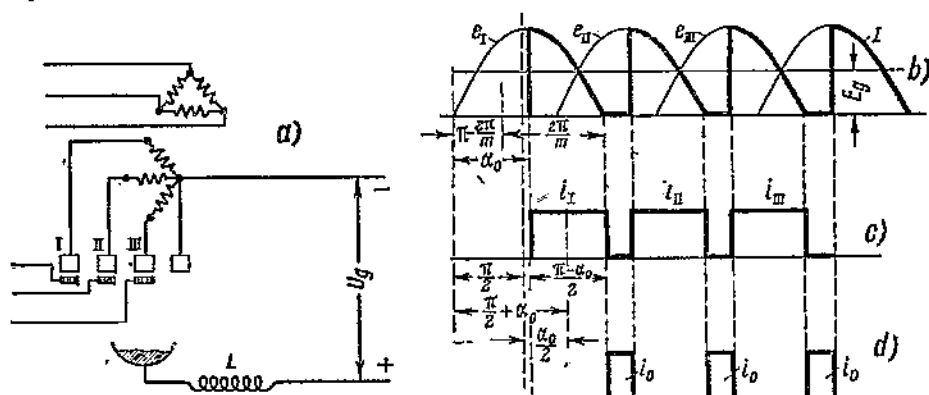
Фиг. 147. Регулировочные характеристики.

Особенностью этой схемы, как видно из фиг. 148, а, является то, что ртутный выпрямитель помимо рабочих анодов, управляемых сетками, имеет еще один неуправляемый анод, присоединяемый непосредственно к нулевой точке трансформатора. Этот анод обычно называют нулевым, или буферным анодом, а схему с таким анодом — схемой с нулевым анодом.

Смысл применения нулевого анода заключается в переводе тока на этот анод на то время, когда питающее напряжение рабочего анода делается отрицательным.

Этот процесс происходит автоматически, поскольку потенциал нулевого анода, присоединенного непосредственно к нулевой точке трансформатора, с наступлением отрицательной полуволны напряжения у рабочего анода становится выше потенциала этого анода и поэтому ток переходит к нулевому аноду (фиг. 148 б, с и д). Работа нулевого анода возможна только с некоторого критического значения угла зажигания $\alpha_{кр}$, равного, как это можно определить по диаграмме фиг. 148, б углу $\pi - \frac{2\pi}{m}$, если отсчет углов регулирования (будем обозначать их теперь через α_0) вести от начала синусоиды фазового напряжения, а не от момента естественного зажигания.

Среднее значение выпрямленного напряжения, если угол регулирования $\alpha_0 > \alpha_{кр}$, определяется по формуле (XII, 82) (если начало отсчета углов сохранить от точки естественного зажигания анодов).



Фиг. 148. Схема с нулевым анодом. *a* — электрическая схема соединений; *b* — диаграмма напряжений; *c* — диаграмма тока в управляемых анодах; *d* — диаграмма тока в нулевом аноде.

Так как при анализе работы данной схемы мы начало отсчета углов регулирования перенесли к началу синусоиды напряжения, то формула (XII, 82) преобразуется в формулу [Л. XII, 28]

$$E_g = \frac{\sqrt{2} E_2 m}{2\pi} (1 + \cos \alpha_0). \quad (\text{XII, 83})$$

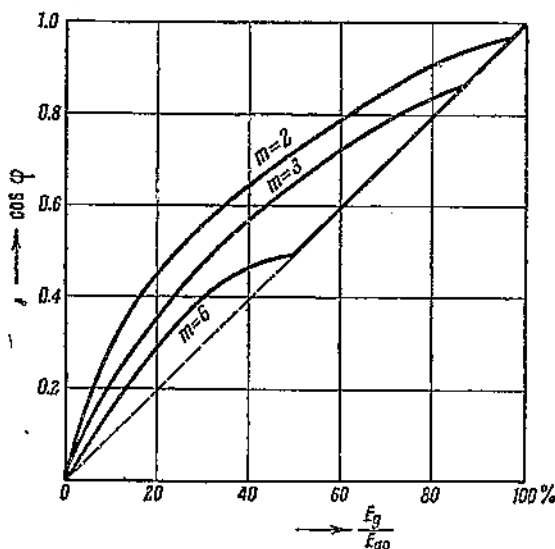
Производя простое тригонометрическое преобразование, мы получаем

$$E_g = \frac{\sqrt{2} E_2 m}{\pi} \cos^2 \frac{\alpha_0}{2}. \quad (\text{XII, 83}')$$

При $\alpha_0 < \alpha_{кр}$ среднее значение выпрямленного напряжения определяется по формуле (VIII, 4').

Определяя коэффициент сдвига $\cos \varphi$ по углу между осью симметрии положительной полуволны напряжения и осью кривой анодного тока (фиг. 148, *c*), получаем

$$\cos \varphi = \cos \frac{\alpha_0}{2}. \quad (\text{XII, 84})$$



Фиг. 149. Кривые коэффициента сдвига в схеме с нулевым анодом.

и осью кривой анодного тока (фиг. 148, *c*), получаем

Подставляя значение $\cos \frac{\alpha_0}{2}$ из формулы (XII, 83') в формулу (XII, 84), получаем

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{\pi \cdot E_g}{V^2 m E_2}}. \quad (\text{XII, 85})$$

На фиг. 149 даны кривые, показывающие изменение $\cos \varphi$ от $\frac{E_g}{E_{g0}}$ для $m=2$, $m=3$, $m=6$.

Для нормальных схем эта зависимость представляет собой прямую линию (показана пунктиром на фиг. 149), а для схем с нулевым анодом — параболу.

Кривые фиг. 149 показывают, что в схемах с нулевым анодом при увеличении угла регулирования α_0 коэффициент сдвига падает значительно медленнее, чем в обычных схемах управляемых выпрямителей.

85. Пульсации в кривых тока и напряжения в управляемых сетках выпрямителей

Формулы для определения пульсации тока в неуправляемых сетках выпрямителей были нами даны в § 5, в котором приведена также таблица значений для гармонических составляющих первых трех кратностей.

При регулировании напряжения сетками кривая выпрямленного напряжения, как это можно видеть из диаграммы фиг. 88, искажается еще больше, и поэтому амплитуды отдельных гармонических заметно увеличиваются, причем это увеличение тем больше, чем больше угол регулирования [Л. XII, 5].

Приурочивая начало отсчета времени к моменту, когда зажигается анод, т. е. записывая напряжение через угол $x - \frac{\pi}{m} + \alpha$ и производя разложение кривой выпрямленного напряжения в ряд Фурье, мы получаем:

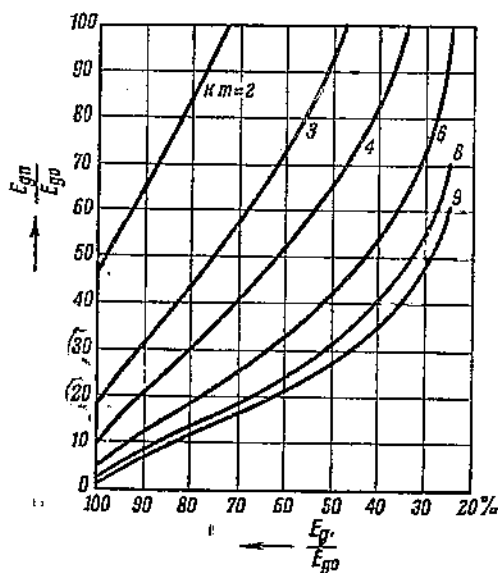
Для амплитуды общего члена синусного ряда

$$\begin{aligned} E_{gn}' &= \sqrt{2} E_2 \frac{m}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{m}} \cos \left(x - \frac{\pi}{m} + \alpha \right) \sin kmx \, dx = \\ &= \sqrt{2} E_2 \frac{m}{\pi} \frac{2km}{k^2 m^2 - 1} \sin \frac{\pi}{m} \sin \alpha. \end{aligned} \quad (\text{XII, 86})$$

В этой формуле $n = km$ обозначает порядковый номер гармонической по отношению к основной волне переменного напряжения.

Амплитуда общего члена косинусного ряда соответственно равна

$$\begin{aligned} E_{gn}'' &= \sqrt{2} E_2 \frac{m}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{m}} \cos \left(x - \frac{\pi}{m} + \alpha \right) \cos kmx \, dx = \\ &= -\sqrt{2} E_2 \frac{m}{\pi} \frac{2}{k^2 m^2 - 1} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha. \end{aligned} \quad (\text{XII, 87})$$



Фиг. 150. Кривые зависимости амплитуд высших гармонических в кривой выпрямленного напряжения при сеточном регулировании от регулируемого напряжения.

Эффективное значение общего члена ряда

$$E_{gn} = E_{g0} \frac{\sqrt{2}}{k^2 m^2 - 1} \sqrt{1 + k^2 m^2 i g^2 a}. \quad (\text{XII}, 88)$$

Относительную величину эффективного значения n -ой гармонической по отношению к напряжению холостого хода мы получаем, разделив обе части равенства (XII, 88) на E_{g0} ,

$$\frac{E_{gn}}{E_{g0}} = \frac{\sqrt{2}}{k^2 m^2 - 1} \sqrt{1 + k^2 m^2 i g^2 a}. \quad (\text{XII}, 89)$$

Вычисленные по данной формуле относительные величины гармонических различных порядков кратности представлены в виде кривых на фиг. 150.

Зная гармонические напряжения, мы можем, пользуясь формулами (II, 31) и (II, 32), найти соответствующие им гармонические составляющие тока.

ГЛАВА XIII

НОВЫЕ ТИПЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

86. Игнайтрон

Игнайтрон — это новый тип ртутного выпрямителя, разработанный фирмой Вестингауз¹ [Л. XIII, 2]. Основными элементами игнайтрона (фиг. 151) являются: железный или графитовый анод 1, ртутный катод 2 и опущенный в ртутный катод игнайтер или зажигатель 4. От последнего элемента игнайтрон и получил свое название.

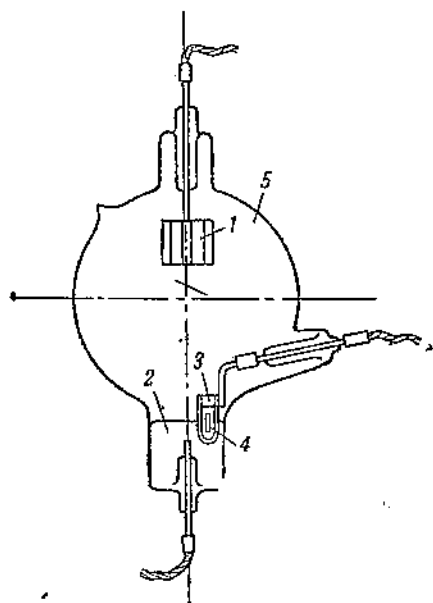
В отличие от обычного ртутного выпрямителя зажигание дуги в игнайтроне производится перед каждым рабочим полупериодом. Этим самым игнайтрон освобождается от анодов возбуждения и зажигания и может управляться без помощи сеток.

В обычном ртутном выпрямителе, где зажигание производится посредством электромеханической системы, такое периодическое зажига-

¹ В нашем Союзе первые типы стеклянных игнайтронов построены в ВЭИ под руководством Д. Уайт с участием Л. П. Мелешкиной. В ВЭИ проведена также разработка типа заканчиваемого ныне изготовлением металлического игнайтрона. Пробыный образец металлического игнайтрона сделан также на Харьковском электромеханическом заводе под руководством Е. Синельникова.

ние, повторяющееся с частотой сети, получить было бы крайне трудно; в игнайтроне же зажигание и гашение вспомогательной дуги производится чисто электрически и потому может повторяться с любой частотой, соответствующей частоте тока.

Теория зажигающего разработана Людвигом и Слепяном [Л. XIII, 4], которые показали, что при пропускании тока через границу двух сред, имеющих резко различные удельные сопротивления, в точках контакта,

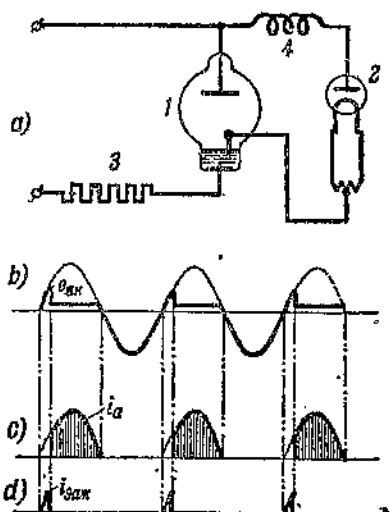


Фиг. 151. Стеклыйный игнайтрон. 1—анод; 2—ртутный катод; 3—держатель зажигающего; 4—зажигающий; 5—стеклянная колба.

между средами получают значительные градиенты потенциала. Так, например, если взять карборунд, из которого чаще всего делаются зажигающие, и ртуть, то при достаточной разности потенциалов в переходном слое (толщиной 10^{-6} — 10^{-8} см) градиенты потенциала между ними оказываются настолько большими, что становится возможна автоэлектронная эмиссия с поверхности ртути и возникновение искры, быстро переходящей в дугу. Эта вспомогательная дуга, создавая катодное пятно на ртути катода, дает возможность перекинуться дуге и на рабочий анод, если в этот момент потенциал последнего по отношению к катоду положителен.

Работа игнайтрона при простейшей схеме питания показана на фиг. 152, а.

В этой схеме зажигающий питается от той же цепи, что и рабочие электроды игнайтрона. В цепь зажигающего включен маломощный вентиль-



Фиг. 152. Схема включения игнайтрона. а—электрическая схема соединения. 1—игнайтрон; 2—вспомогательный выпрямитель (газотрон); 3—нагрузочное сопротивление; 4—сопротивление для защиты газотрона от перегрузок; б—линейная диаграмма напряжения между анодом и катодом; в—линейная диаграмма анодного тока; д—диаграмма тока в цепи зажигающего.

ный прибор (газотрон 2) с тем, чтобы вспомогательная дуга на зажигаееле возникала только в течение положительной полуволны рабочего напряжения. Как только напряжение в цепи зажигаееля оказывается достаточным, чтобы зажечь дугу в газотроне (10—12 V), по цепи зажигаееля начинает проходить ток. По достижении этим током определенной величины между зажигаеелем и ртутью появляется искра, быстро переходящая в дугу. За дугой на зажигаееле появляется дуга и на рабочем аноде.

С момента появления последней ток в цепи зажигаееля падает до ничтожно малой величины, так как цепь зажигаееля шунтируется главной дугой в игнайтроне.

Сказанное иллюстрируется линейными диаграммами *b*, *c* и *d* на той же фиг. 152.

Верхняя диаграмма *b* показывает напряжение между анодом и катодом игнайтрона, средняя диаграмма *c* — ток в цепи анода при чисто омическом сопротивлении, а нижняя *d* — ток в цепи зажигаееля.

Из этих диаграмм мы видим, что, пока ток идет через цепь зажигаееля, напряжение между анодом и катодом изменяется по синусоиде; тока в цепи анода в это время нет. Когда ток через зажигаеель достигает критического значения, зажигается дуга на аноде и между анодом и катодом игнайтрона устанавливается напряжение горения 12—15 V. Последнее совершенно недостаточно для поддержания тока в цепи зажигаееля, и ток в этой цепи спадает до нуля.

Критическое значение тока, при котором возникает дуга на зажигаееле, зависит от его удельного сопротивления. Последние изыскания, проведенные в ВЭИ инж. Д. Уайт [Л. XIII, 6], показали, что критический ток примерно равен 1—2 А при напряжении зажигания около 30 V. Такие данные получаются при специально изготовленных карборундовых стержнях, имеющих значительно большее удельное сопротивление в поверхностном слое, чем во внутренних слоях.

В схеме, показанной на фиг. 152, происходит выпрямление только одной полуволны напряжения, для выпрямления обеих полуволн применяется схема с двумя игнайтронами (фиг. 153).

Игнайтроны как стеклянные, так и металлические выполняются обычно одноанодными.

Если выпрямительная установка нуждается в регулировке напряжения, то в схемах с игнайтроном это достигается изменением момента подачи напряжения на зажигаеель. Для этого можно воспользоваться любой из схем сеточного регулирования. Одной из простейших схем является включение в цепь зажигаееля тиратрона (фиг. 154, *a*).

Сдвигая в этом случае посредством фазорегулятора 3 момент зажигания тиратрона 2 на угол α по отношению к нулю главного напряжения, мы тем самым смещаем начало прохождения тока через игнайтрон примерно на тот же угол α (фиг. 154, *b*).

Меняя угол α от нуля до 180° (в однофазной схеме), мы можем при чисто омической нагрузке изменять напряжение выпрямленного тока от максимального значения до нуля. Это иллюстрирует кривая фиг. 154, *c*.

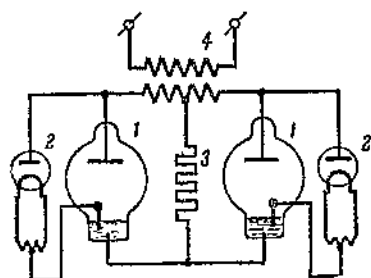
В тех случаях, когда применения фазорегулятора желательно избежать, для сеточного управления тиратроном может быть применена

схема Гейгера, описанная в § 42,4, или схема с контактной шайбой (§ 42,1).

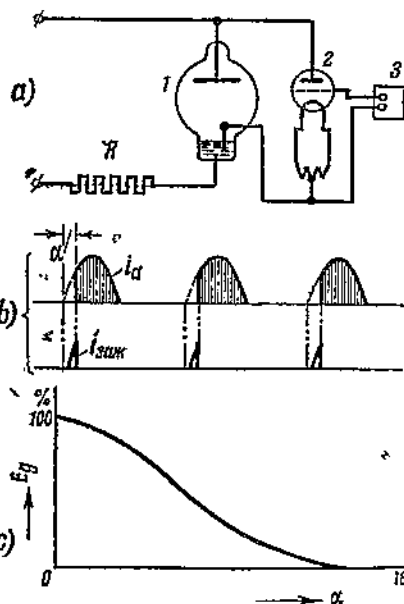
Рассмотренные схемы показывают, что работа зажигающего в ignitronе не только освобождает выпрямитель от устройства отдельной схемы зажигания и возбуждения, но и от сеток у анодов.

Дальнейшими преимуществами ignitronа по сравнению с обычным типом выпрямителя являются:

1. Отсутствие ионизированного столба дуги, постоянно горячей на анодах возбуждения. Это уменьшает вероятность обратных зажигания и потому позволяет приблизить анод к катоду. В результате сближения электродов мы получаем в ignitronе заметное уменьшение падения напряжения



Фиг. 153. Схема двухполупериодного выпрямления тока ignitronа. 1 — ignitроны; 2 — вспомогательные выпрямители (газотроны); 3 — нагрузочное сопротивление; 4 — питающий трансформатор.



Фиг. 154. Схема регулирования напряжения ignitronами. а — электрическая схема соединений: 1 — ignitрон; 2 — вспомогательный тиратрон; 3 — приборы сеточного регулирования; б — линейные диаграммы токов анода и зажигающего; в — кривая зависимости среднего значения выпрямленного напряжения от угла сдвига.

в дуге, которое составляет примерно 12—15 В.

2. Уменьшение потерь в вспомогательных цепях выпрямителя.

Потери в цепи зажигающего ignitronа заметно меньше потерь в цепи возбуждения нормального выпрямителя.

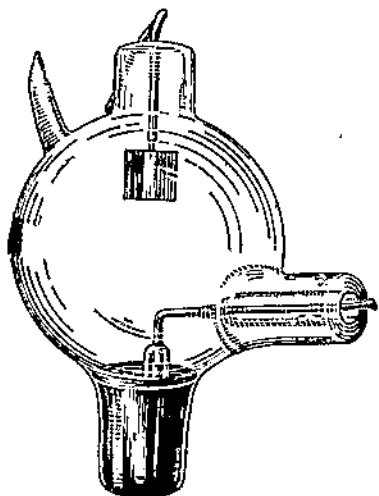
3. Возможность выделения анодов вместе с зажигающими и катодами в отдельные баки при общей вакуумной системе (металлический ignitрон). Этим предотвращается мешающее действие ионизированного столба дуги соседнего горящего анода.

4. По сравнению с тиратронами преимущество ignitronов заключается в их большой перегрузочной способности благодаря неограниченной эмиссии катода.

Конструктивное выполнение ignitronов также проще. Стеклоплатные ignitроны, которые строятся на токи до 60—100 А (среднее значение) при напряжении до 500 В, не требуют такого количества вводов,

как стеклянные ртутные выпрямители. Внешний вид стеклянного игнайтрона, изготовленного в лаборатории ВЭИ, показан на фиг. 155. Разрез металлического игнайтрона, заканчиваемого постройкой в ВЭИ, показан на фиг. 156.

Особенностями данной конструкции являются: составление многоанодного игнайтрона из шести одноанодных игнайтронов, связанных общим внешним кожухом, общей системой охлаждения 4 и вакуумной системой 5. Каждый из анодов 1 игнайтрона и соответствующий ему катод 3 заключены в отдельный бак, каждый из катодов имеет свой зажигатель 2. В игнайтроне отсутствует конденсационный цилиндр, что возможно благодаря резкому уменьшению количества испаряющейся ртути из-за исчезновения постоянно действующей дуги возбуждения и интенсивного охлаждения катода.



Фиг. 155. Стеклянный игнайтрон ВЭИ на 30 А (среднего значения).

Последнее позволяет также более близко расположить аноды к поверхности ртути катода и отказаться от анодных манжет. Короткие зонты над анодами защищают их от попадания капель конденсирующейся в верхней крышке цилиндра ртути. В результате размеры игнайтрона получаются значительно меньше по сравнению с размерами ртутных выпрямителей нормального типа.

Перечисленные выше преимущества игнайтрона определяют уже сейчас ряд областей, где игнайтрон может успешно конкурировать как с тиратроном, так и с ртутным выпрямителем.

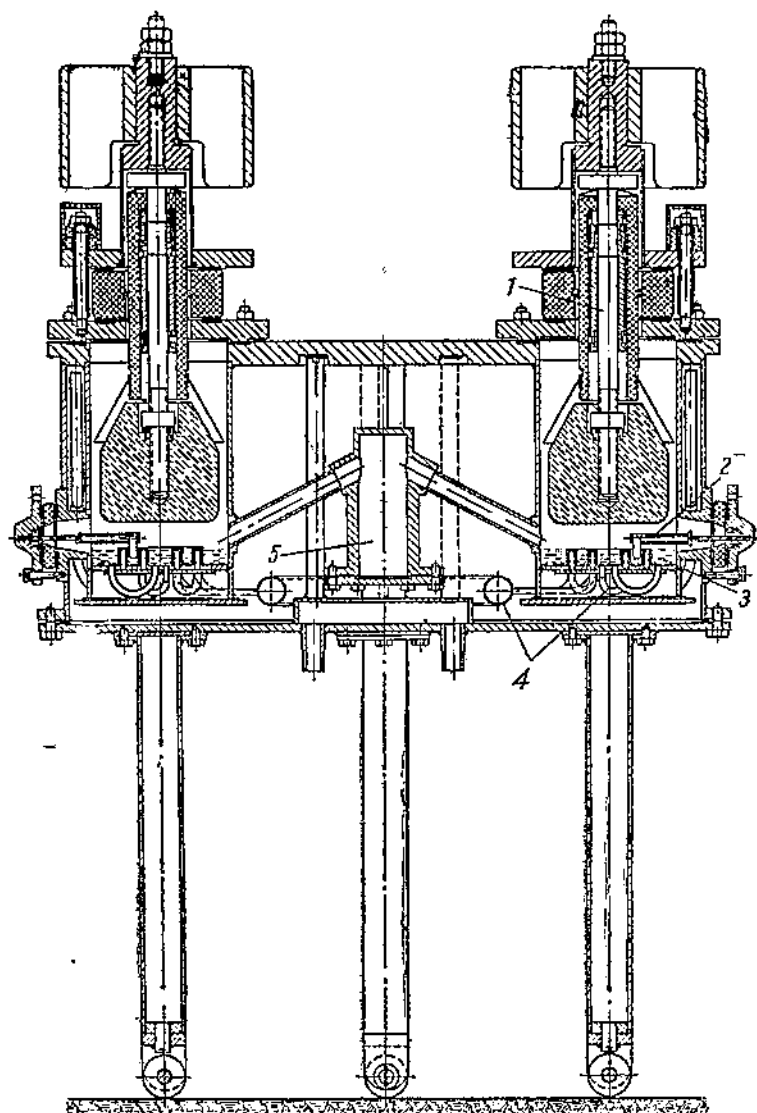
К таким областям в первую очередь относятся: 1) электросварка, где требуются периодические и значительные по величине импульсы тока, и область ионных выключателей, где требуются кратковременные перегрузки, сочетаемые с быстрым включением в действие ионного выключателя.

Одна из схем применения игнайтрона для электросварки показана на фиг. 157. В схеме применены два игнайтрона 1 для возможности пропускания тока в двух направлениях через первичную обмотку сварочного трансформатора 2. Управление цепями зажигателей 3 блокируется с замыкателем вторичной обмотки сварочного трансформатора так, что продолжительность и количество импульсов тока могут регулироваться в весьма широком диапазоне.

Принципиальная схема применения игнайтрона в качестве ионного выключателя показана на фиг. 158. В этой схеме цепь игнайтрона 2 шунтирует цепь воздушного выключателя 1.

При такой схеме напряжение, появляющееся между начинающими расходиться контактами выключателя 1, подается на зажигатель. Включающийся за этим игнайтрон берет на себя весь выключаемый ток. При

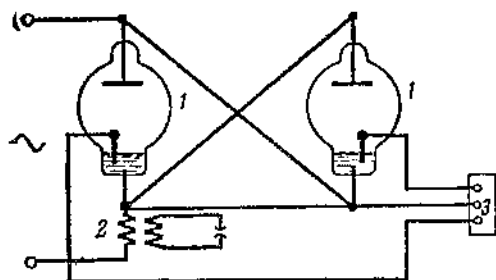
перемене полярности на контактах выключателя ток спадает до нуля, дуга тухнет, и в следующий полупериод она загореться не может, если



Фиг. 156. Шестифазный металлический игнайтрон ВЭИ на 1 000 А и 600 В выпрямленного тока. 1 — анод; 2 — зажигающий; 3 — катод; 4 — охлаждающие трубы; 5 — труба для откачки.

прочность промежутка в воздушном выключателе достаточна, чтобы противостоять полному напряжению сети. Конденсатор 4 в данной

схеме служит для того, чтобы предупредить возможность повторного зажигания игнайтрона в следующий положительный полупериод рабочего напряжения.



Фиг. 157. Схема для электросварки с игнайтронами: 1—игнайтроны; 2—сварочный трансформатор; 3—фазорегулятор и система зажигания игнайтронов.

Игнайтрон может быть также использован как реле, которое, обладая чувствительным элементом, в то же время имеет мощные контакты для непосредственного включения цепей с большим током.

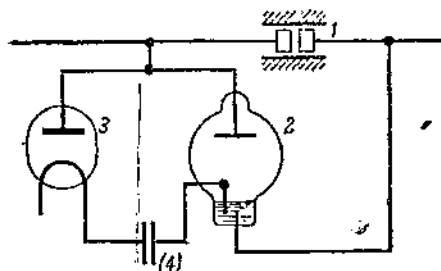
Схема такого реле показана на фиг. 159. Здесь в сеточную цепь вспомогательного тиратрона может быть включено чувствительное реле: фото- или термореле 3. При действии этого реле оно сообщает

сеточной цепи достаточное напряжение для включения в работу зажигающего, и игнайтрон 1 замыкает пусковую оперативную цепь.

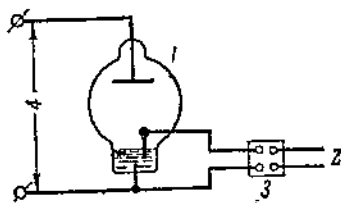
87. Выпрямитель с дугой в атмосфере

Эрвин Маркс разработал (пока лабораторно) тип дугового выпрямителя, дуга в котором горит не в вакууме, а в воздухе при нормальных или повышенных давлениях в зависимости от рабочего напряжения выпрямителя [Л. XIII, 7—11]. Разрез такого выпрямителя показан на фиг. 160.

Как видно из фигуры, выпрямитель состоит из двух совершенно симметричных электродных комплектов, если не считать вспомога-



Фиг. 158. Принципиальная схема игнайatronного выключателя. 1 — воздушный выключатель; 2 — игнайтрон; 3 — вспомогательный газотрон; 4 — конденсатор.



Фиг. 159. Схема игнайatronного реле. 1 — игнайтрон; 2 — управляющая цепь; 3 — вспомогательное реле, 4 — управляемая цепь.

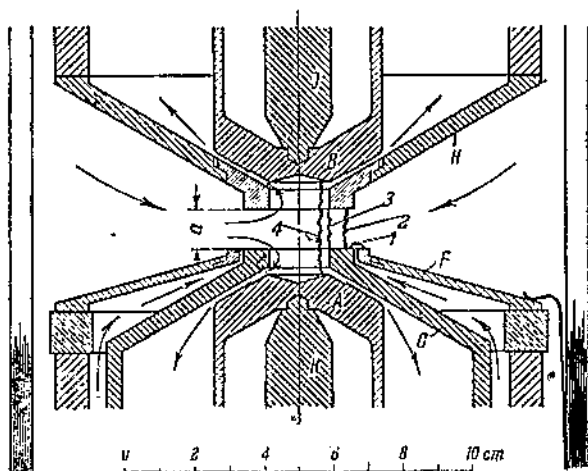
ного зажигающего электрода F , охватывающего только один из рабочих электродов.

Два электродных комплекта включают в себя главные полюса (A и B), между которыми горит дуга в течение рабочей части периода

переменного тока, и затем экранирующие электроды (C и H), на которых дуга зажигается до перехода на главные электроды. Перевод дуги с одних электродов на другие производится струей воздуха, направление прохождения которой показано на чертеже стрелками. Воздух, обдувая извне экранирующие электроды, делает крутой поворот у полюсных наконечников и, скользя вдоль поверхности главных полюсов, выходит наружу.

На фиг. 160 показаны все четыре переходные положения дуги.

В положении 1 дуга горит между анодом зажигания и одним из экранирующих электродов (между F и C). Струей воздуха дуга перебрасывается затем с анода зажигания на второй экранирующий электрод, оказываясь в положении 2. Затем увеличенным потоком воздуха дуга перемещается в положение 3, откуда она переходит на



Фиг. 160. Схематический разрез выпрямителя Маркса. A и B — главные электроды; C и H — экранирующие электроды; F — электрод зажигания; J , K — сердечники магнитов; 1, 2, 3, 4 — различные положения дуги.

главные аноды в положение 4, где она и горит оставшуюся по условиям схемы часть периода. Для того чтобы обеспечить равномерное обгорание полюсных наконечников главных полюсов, дуга на этих полюсах не остается неподвижной, а получает вращательное движение благодаря радиальному магнитному полю. Последнее создается магнитными сердечниками J и K и замыкается через железные наконечники экранирующих электродов.

После погасания дуги оставшиеся ионы быстро уносятся воздушным потоком, и электрическая прочность между электродами восстанавливается.

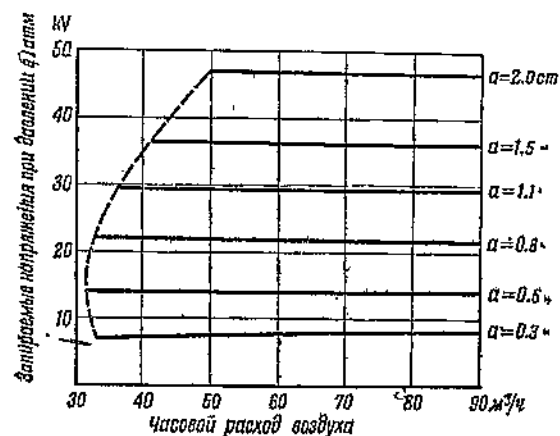
Благодаря тому что экранирующие электроды расположены на более близком расстоянии, чем главные электроды, они защищают более горячие места главных электродов от непосредственного воздействия сильных электрических полей и тем самым повышают надежность ра-

боты выпрямителя в отношении вероятности появления обратных зажигания.

Роль воздушного дутья в данном выпрямителе сводится не только к направлению дуги в рабочий полупериод и деионизации пространства, но и к охлаждению электродов.

Исследования Маркса показали [Л. XIII, 10], что в выпрямителях с током до 50 А для охлаждения электродов можно ограничиться воздушным дутьем; при токах выше 50 А приходится применять водяное охлаждение.

Преимуществом данного типа выпрямителя является возможность его изготовления на высокие напряжения.



Фиг. 161. Кривые запираемых напряжений в зависимости от количества продуваемого воздуха при различных расстояниях между электродами (a — расстояние между электродами).

Увеличение количества продуваемого воздуха при заданном расстоянии между электродами не ведет к заметному повышению величины запираемого напряжения, как это можно видеть из фиг. 161, где показаны кривые запираемых напряжений в зависимости от количества воздуха при разных заданных расстояниях между электродами.

Однако для каждого из расстояний существует минимально необходимый объем (пунктирная кривая на фиг. 161). При дальнейшем уменьшении количества продуваемого воздуха выпрямитель совершенно перестает запирает. Этот минимальный объем воздуха, очевидно, необходим для достаточно быстрой деионизации воздушного промежутка.

Воздух в выпрямителе Э. Маркса выполняет, таким образом, две функции: 1) уносит остатки ионов от потухающей дуги, 2) служит в качестве охлаждающей среды.

В более мощных типах выпрямителей кроме воздушного охлаждения требуется также и водяное охлаждение. Последнее осуществляется путем прокладки охлаждающих змеевиков внутри рабочих электродов. Система чисто воздушного охлаждения схематически показана на

При нормальном атмосферном давлении воздуха вентиляльная прочность воздушного промежутка между электродами может быть определена примерной величиной градиента поля в 25 кВ/см.

При повышенном давлении вентиляльная прочность увеличивается до

$$U_{обр} = 25 p \cdot a, \quad (\text{XIII}, 1)$$

где

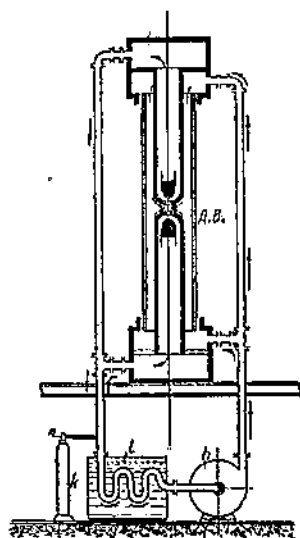
$U_{обр}$ — максимум запираемого напряжения;

a — расстояние между экранирующими электродами в см;

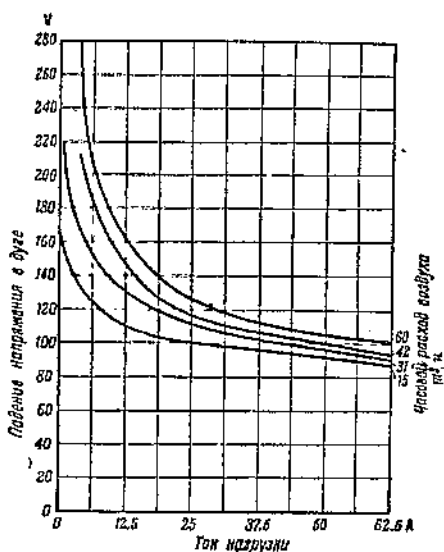
p — давление воздуха в ат [Л. XIII, 10].

фиг. 162. Нужное для запирания высоких напряжений повышенное давление создается здесь баллоном с сжатым воздухом k , включенным в замкнутую систему выпрямителя, а требуемый сравнительно небольшой перепад давлений создается вентилятором h . Воздух охлаждается в радиаторе l , омываемом проточной водой.

Благодаря удачному подбору формы полюсных наконечников электродов, магнитного поля, а также объема и силы воздушного дутья



Фиг. 162. Замкнутая система воздушного охлаждения дугового выпрямителя; Д. В.— дуговой выпрямитель, k — баллон с сжатым воздухом; h — вентилятор; l — радиатор.



Фиг. 163. Кривые падения напряжения в выпрямителе с дугой в воздухе.

700 кВ при малых токах и при токах в несколько сот ампер при напряжении до 70 кВ¹. При минимальном расстоянии между электродами падение напряжения в дуге данного выпрямителя достигает 80—90 В. На фиг. 163 показаны кривые падения напряжения в дуге выпрямителя в зависимости от величины рабочего тока для расстояния между электродами в 0,5 см при разном количестве воздуха, пропускаемого через выпрямитель.

При других расстояниях между электродами выпрямителя падение напряжения в дуге может быть определено по формуле

$$\Delta U_g = E + U_{a.k.} \quad (\text{XIII}, 2)$$

где $U_{a.k.}$ представляет собой мало изменяющуюся величину суммарного падения напряжения у анода и катода;

l — длина дуги в см;

¹ Необходимо отметить, однако, что примененный Марксом метод испытаний не дает оснований считать, что результаты, полученные им, достаточно надежны.

E — градиент потенциала в столбе дуги.

Последняя величина в зависимости от условий охлаждения и плотности тока колеблется в пределах от 5 до 50 В/см.

Недостатками данного типа выпрямителя являются: 1) обгар электродов, в силу чего необходимо наконечник электродов периодически менять (по сообщению Маркса раз в 3—4 мес.) и 2) отсутствие простого и надежно действующего зажигательного приспособления.

Раньше Э. Маркс применял для зажигания дуги высокочастотный контур с трансформатором Тесла. Вследствие сложности такой системы зажигания Маркс в последних конструкциях перешел к зажиганию посредством вспомогательного электрода, при котором по сообщению Маркса зажигание происходит при напряжении 300—400 В и малых токах. Данные об источнике питания и схеме последней системы зажигания не опубликованы.

В ВЭИ были применены опыты с применением принципа игнайтронного зажигания, но разработка этого метода еще не закончена.

ГЛАВА XIV

ИНВЕРТИРОВАНИЕ И ДВУХСТОРОННЕЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТОКА

88. Переход от выпрямления к инвертированию тока

Преобразование постоянного тока в переменный (инвертирование тока) есть процесс, обратный выпрямлению.

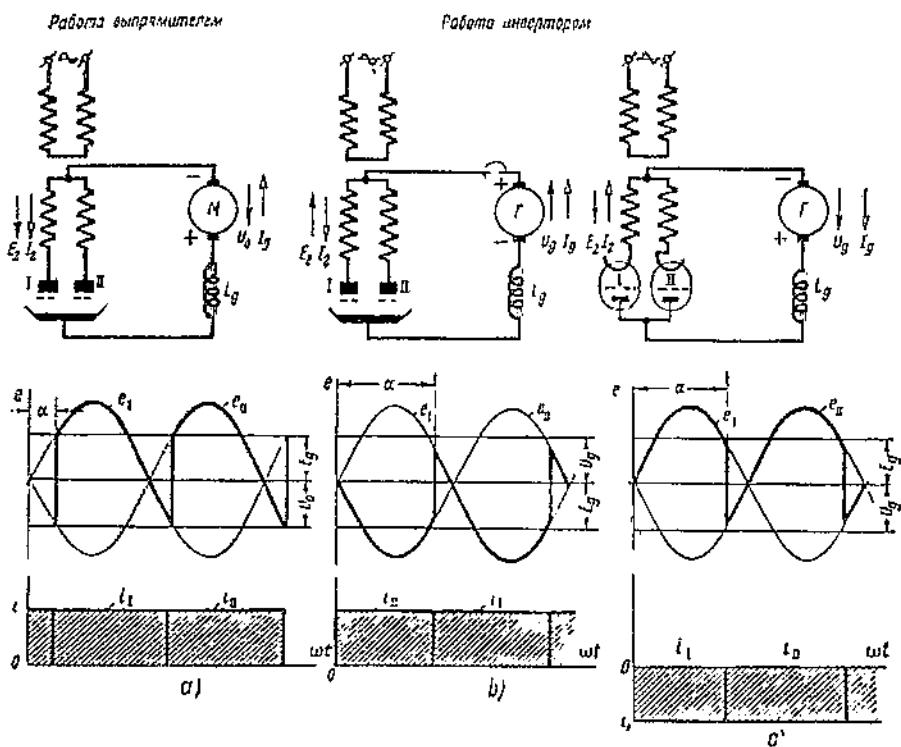
При работе ионного прибора в качестве выпрямителя тока поток энергии направлен из сети переменного тока в сеть постоянного тока. При этом ток и напряжение в обмотке трансформатора (присоединенной к выпрямителю) в рабочую часть периода совпадают по направлению (фиг. 164, *a*), а в двигателе, являющемся потребителем энергии, ток и э. д. с. направлены противоположно. Ток по контуру, включающему в себя вторичную обмотку трансформатора, вентильный прибор и двигатель постоянного тока, проходит в этом случае под действием переменного напряжения, направленного в проводящем направлении по контуру, и против постоянного напряжения (противо-э. д. с.), развиваемого двигателем.

При инвертировании тока поток энергии должен быть направлен из сети постоянного тока в сеть переменного тока, т. е. он должен иметь направление, обратное тому, которое он имеет при выпрямлении тока. Ясно, что для создания такого направления потока энергии в преобразовательном контуре необходимо, чтобы ток и напряжение в обмотке трансформатора в течение рабочей части периода были направлены противоположно (фиг. 164, *b* и *c*), а в машине постоянного тока, являющейся в данном случае генератором тока, эти величины были направлены одинаково [Л. XIV, 7].

Первое необходимое условие такой работы мы получаем, если напряжение источника постоянного тока мы включим в проводящем направлении по контуру, а в качестве рабочей полуволны переменного напряжения мы выберем ту полуволну, которая дает напряжение,

направленное навстречу постоянному напряжению. Переменное напряжение явится в этом случае противодействующим напряжением. Выбрав надлежащим образом величины этих напряжений (напряжение источника постоянного тока должно быть несколько больше среднего значения напряжения трансформатора), мы получим в данный полупериод тока требуемый рабочий режим.

Второе необходимое условие для работы на инверторном режиме заключается в том, чтобы не допустить прохождения тока по контуру



Фиг. 164. а — схема и линейные диаграммы при выпрямлении тока; б — схема и линейные диаграммы при инвертировании тока, при сохранении направления для тока; в — схема и линейные диаграммы при сохранении направления для напряжения.

в течение следующего полупериода, когда переменное напряжение, изменив свое направление, суммируется с постоянным напряжением; прохождение тока в этот полупериод означало бы короткое замыкание инверторного контура, так как ток в контуре ограничен в этот полупериод лишь сопротивлением самого контура. Для предупреждения прохождения тока в эту часть периода служат сетки, управляющие началом дугового разряда на анодах инвертора. Сетки, собственно говоря, и открыли возможность применения ионного прибора в качестве инвертора тока.

Действия сеток и схемы сеточного управления при инвертировании тока те же, что и при выпрямлении. Количественная разница заключается лишь в том, что при инвертировании тока сетка должна запираеть приблизительно двойное обратное напряжение (получающееся от сложения переменного и постоянного напряжений) и потому отрицательные сеточные потенциалы должны быть больше (при одном и том же рабочем напряжении). Запирая сеткой разряд в течение той или иной части периода переменного тока, мы можем, таким образом, перейти от выпрямления тока к инвертированию.

Практически этот переход может быть осуществлен двумя способами. При первом способе, показанном на фиг. 164, б, встречное направление тока и напряжения в обмотке трансформатора мы получаем, сохранив направление для тока в обмотке и изменив направление для напряжения, используя при этом в качестве рабочей полувольты напряжения отрицательную полувольту. Этот способ требует изменения полярности на стороне постоянного тока.

Другой способ показан на фиг. 164, с. Здесь сохранено то же направление для рабочего напряжения, что и при выпрямлении, но изменено направление тока путем пересоединения ионного преобразователя. К свободным концам обмотки трансформатора присоединены в этом случае не аноды преобразователя, а катоды. Этот способ возможен только при изолированных друг от друга катодах (например, когда преобразователь собран из одноанодных приборов).

При выпрямлении анодный ток (фиг. 164, а) протекает большую часть времени при положительной полувольте напряжения; эта же полуволна определяет и знак среднего значения выпрямленного напряжения, обозначаемого нами через E_g . Против-э. д. с. двигателя постоянного тока U_0 противоположна по направлению действия в контуре напряжению E_g и потому находится с ним в разных сторонах от оси абсцисс.

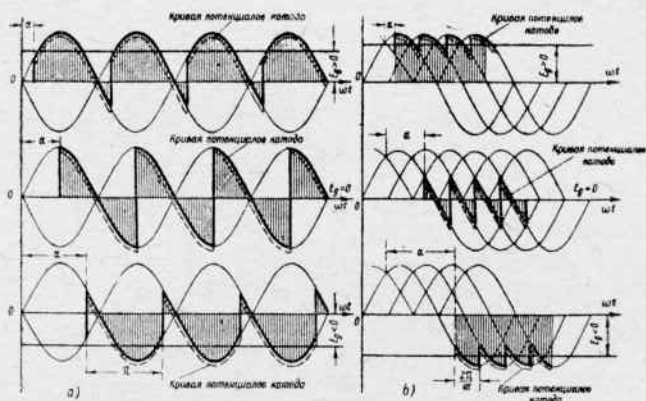
При переходе на режим инвертирования при неизменном направлении для тока (фиг. 164, б) рабочей является отрицательная полуволна напряжения. Эта же полуволна напряжения определяет и знак среднего значения переменного напряжения E_g , линия которого в этом случае расположена под осью абсцисс, а напряжение источника постоянного тока U_g — над осью абсцисс.

При переходе на режим инвертирования при сохранении направления для напряжения (фиг. 164, с) анодный ток протекает большую часть времени при положительной полувольте напряжения, но имеет знак, обратный знаку в двух предыдущих случаях.

Так как второй способ перехода на режим инвертора требует, как указывалось выше, сборки преобразователя из одноанодных приборов, то на практике он встречается значительно реже, и потому дальнейшее изложение рабочего процесса инвертора мы будем вести, предполагая, что в качестве рабочей полувольты используется отрицательная полуволна напряжения.

Постепенный переход от режима выпрямления тока к режиму инвертирования мы можем совершить, постепенно меняя угол α (отсчитываемый нами и при режиме инвертирования тока от точки естественного зажигания анодов при выпрямлении тока).

Диаграмма напряжений при таком переходе показана для двухфазного преобразователя на фиг. 165, *a*, для многофазного преобразования — на фиг. 165, *b*. Рабочий участок кривых на этих диаграммах заштрихован. Так как при многофазном инвентировании ток через каждый из анодов проходит, так же как и при выпрямлении тока, только в течение $\frac{2\pi}{m}$ части периода (если не учитывать угла перекрытия и возможности разрывов в кривой тока при малых индуктивностях), то рабочий участок имеет и здесь продолжительность, измеряемую углом $\frac{2\pi}{m}$. Среднее значение противодействующего переменного напряжения



Фиг. 165. *a* — диаграмма постепенного перехода от выпрямления к инвентированию тока для двухфазного преобразователя; *b* — то же для шестифазного преобразователя.

(жирная кривая на фиг. 165, *a* и *b*) определяется по ранее выведенной формуле (VIII,4')

$$E_g = E_{g0} \cos \alpha = \frac{\sqrt{2} m \sin \frac{\pi}{m}}{\pi} E_2 \cos \alpha, \quad (\text{XIV},1)^1$$

поскольку все данные, послужившие основанием к выводу этой формулы, сохраняются и здесь. Анализируя уравнение (XIV,1), мы видим, что при углах $\alpha < 90^\circ$ мы получаем для среднего значения напряжения положительную величину, — это соответствует режиму выпрямления тока.

При $\alpha = 90^\circ$ площадь, ограниченная положительной частью кривой переменного напряжения, равна площади, ограниченной отрицательной частью кривой, и потому среднее значение напряжения равно нулю. Это есть граничная точка перехода от режима выпрямления к инверторному режиму.

При углах $\alpha > 90^\circ$ E_g делается величиной отрицательной. Это соответствует режиму инвентирования тока.

¹ Для удобства пользования формула занумеровывается вторично.

Кривая потенциалов катода проходит при обоих режимах работы по кривой, лежащей (см. пунктирная кривая на фиг. 165) на величину падения напряжения в дуге (20—25 В) ниже рабочих участков синусоид переменного напряжения.

Отрезки ординат, заключенные между кривой катодных потенциалов и прямой, определяющей напряжение источника постоянного тока, выражают результирующее напряжение, затрачиваемое на активные и реактивные падения напряжения в преобразовательном контуре.

Предельным углом регулирования при инверторном режиме, если не учитывать периода коммутации и деионизации (§ 89), является угол $\alpha = 180^\circ$, так как при больших значениях этого угла потенциал анода, который должен вступить в работу (зажигаемый анод), становится ниже потенциала работающего анода, в силу чего дуга на зажигаемый анод не перейдет, а будет продолжать гореть на работающем аноде. Это приводит, как известно, к режиму короткого замыкания в инверторной схеме.

Реально максимальные углы регулирования должны быть меньше 180° , так как известный промежуток времени, определяемый параметрами схемы и инвертора, требуется для коммутации тока и деионизации дуги, которые должны предшествовать критической точке, определяемой углом $\alpha = 180^\circ$.

89. Коммутация тока в инверторе

Ток через анодные цепи инвертора идет под действием постоянного напряжения, стремящегося поддержать непрерывность горения дуги на работающем аноде.

Обеспечение условий нормальной работы инвертора, при которой ток должен переходить в каждую поддувную напряжения с одного анода на другой (коммутация тока), требует, очевидно, здесь некоторых искусственных мер.

Одной из таких мер может явиться введение в цепь анодов в период коммутации тока дополнительной э. д. с., которая была бы направлена навстречу рабочему напряжению в цепи анодов.

Такую коммутирующую э. д. с. мы можем получить или за счет переменного напряжения, если только в цепи переменного тока имеется независимый источник питания, или же путем включения в схему конденсаторов, если единственным источником питания в цепи переменного тока является инвертор.

а) Коммутация при наличии независимого источника питания. Сообщив сетке очередного анода положительный потенциал, до того как данный анод делается отрицательным по отношению к работающему аноду (фиг. 166, *b* и *c*), мы создаем возможность зажечься дуге и на втором аноде. Тогда в течение определенного промежутка времени, определяемого величиной индуктивности в фазах трансформатора (фиг. 166, *a*) и рабочим током, два анода горят одновременно, причем ток в цепи вступающего в работу анода I' возрастает, а ток в цепи анода, заканчивающего свою работу I , спадает до нуля. Аналитически процесс перехода тока (коммутация тока) может быть рассмотрен как

процесс, совершающийся под действием тока i_k , протекающего в короткозамкнутом контуре, образованном двумя одновременно горящими анодами под действием разности э. д. с. в двух фазах. Направление тока i_k , определяемое направлением действия разности э. д. с. в обеих фазах, в цепи анода заканчивающего свою работу противоположно рабочему току, а в цепи анода, вступающего в работу, оно совпадает с рабочим током.

При достаточной величине коммутирующего тока i_k ток в первом аноде через короткий промежуток времени, измеряемый углом γ (угол коммутации или угол перекрытия), падает до нуля, а во втором аноде он возрастает до нормальной рабочей величины.

Определим величину угла коммутации в зависимости от нагрузки и прочих параметров цепи при учете угла регулирования α .

Нумеруя напряжение двух чередующихся по работе анодов, для которых мы рассматриваем коммутационный режим, цифрами 1 и 2, мы можем напряжение данных анодов записать уравнениями [Л. XIV, 8]

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \sqrt{2} E_2 \sin \left(\omega t + \psi + \frac{2\pi}{m} \right), \\ e_2 &= \sqrt{2} E_2 \sin (\omega t + \psi), \end{aligned} \right\} \quad (\text{XIV}, 2)$$

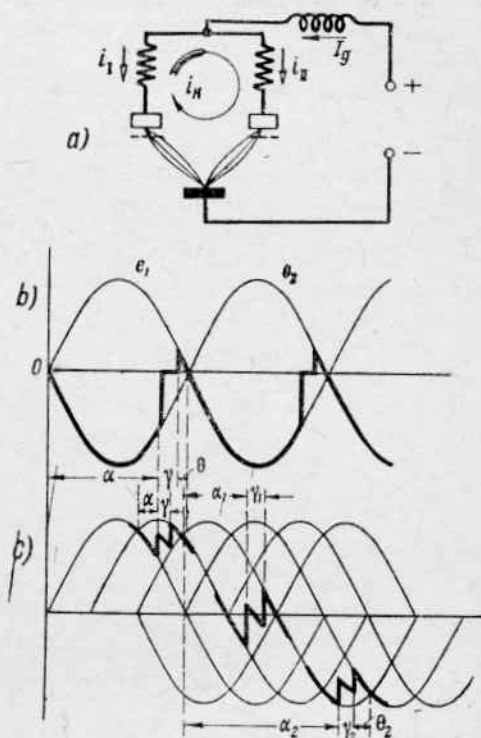
где E_2 — эффективное значение переменного напряжения вторичной обмотки трансформатора;

ψ — начальная фаза отсчета. Разность напряжений этих фаз будет

$$e_k = e_2 - e_1 = -2 \sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m} \cos \left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{m} \right). \quad (\text{XIV}, 3)$$

Приурочивая начало отсчета времени для кривых напряжения к моменту начала коммутации $\psi = \alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$, мы получаем

$$e_k = 2 \sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m} \sin (\omega t + \alpha). \quad (\text{XIV}, 3')$$



Фиг. 166. *a* — схема коммутации тока в инверторе; *b* — диаграмма напряжений при двухфазном режиме; *c* — диаграмма напряжений при многофазном режиме.

Это переменное напряжение действует в контуре, содержащем индуктивность от потоков рассеяния двух обмоток трансформатора $2X_a$, а также омические сопротивления этих обмоток $2R_a$.

Определяя ток в контуре, как ток нестационарного режима, мы имеем

$$i_k = \frac{\sqrt{2} E_2}{\sqrt{R_a^2 + X_a^2}} \sin \frac{\pi}{m} \left\{ \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R_a}{L_a} t} \right\}. \quad (\text{XIV}, 4)$$

Пренебрегая активным сопротивлением контура, т. е. полагая $R_a = 0$ (при котором $\varphi = \frac{\pi}{2}$) и имея в виду, что к концу периода коммутации при $\omega t = \gamma$ ток i_k становится равным I_g , мы можем предыдущее уравнение переписать в таком виде

$$I_g = -\frac{\sqrt{2} E_2}{X_a} \sin \frac{\pi}{m} [\cos(\alpha + \gamma) - \cos \alpha] \quad (\text{XIV}, 5)$$

или

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{I_g X_a}{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}, \quad (\text{XIV}, 5')$$

Полученное уравнение дает нам возможность определить угол коммутации в зависимости от тока нагрузки, величины индуктивности в фазах трансформатора, напряжения E_2 и, наконец, от угла регулирования α . Так как напряжения одновременно проводящих ток анодов в период коммутации одинаковы (общие потенциалы у нулевой точки и у анодов инвертора связанных дугой), то (§ 79) кривая переменного напряжения в период коммутации является среднеарифметической кривых напряжения коммутируемых фаз.

Такой ход кривой в период коммутации влияет на среднее значение рабочего участка кривой переменного напряжения. При выпрямлении тока это влияние сказывалось в сторону уменьшения среднего значения выпрямленного напряжения; при инверторном режиме изменение хода кривой напряжения, вызванное процессом коммутации, ведет, наоборот, к повышению среднего значения напряжения. Действительно, из-за процесса коммутации, как это видно из фиг. 166, площадь кривой напряжения, определяющая среднее значение переменного напряжения, увеличивается по сравнению со значением этого напряжения при периоде коммутации равным нулю.

Величина добавляемого напряжения, вызванного процессом коммутации, определяется по той же формуле (XII, 20'), как и при выпрямлении тока, т. е.

$$e_r = \frac{m I_g X_a}{2\pi},$$

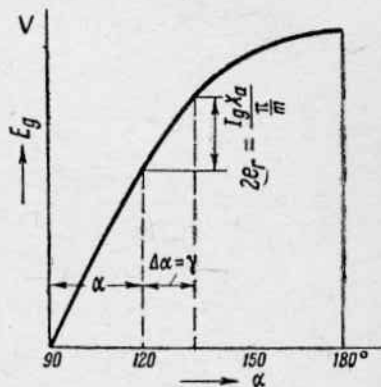
так как все предпосылки к выводу этой формулы здесь те же, что и при выпрямлении тока (§ 79).

Зная нормальный ток инвертора I_g и приведенную к вторичной обмотке величину индуктивности трансформатора, мы можем найти угол перекрытия γ простым графическим построением.

Действительно, по диаграмме фиг. 166, с мы видим, что индуктивное падение напряжения из-за перекрытия, длящегося γ в два раза меньше того падения напряжения, которое мы получили бы из-за возрастания на такую же величину угла регулирования ($\Delta\alpha = \gamma$).

Зная это, мы строим кривую напряжения E_g в зависимости от угла α (фиг. 167) по уравнению (XIV,1) и прибавляем к ординате, соответствующей углу α , двойную величину индуктивного падения напряжения

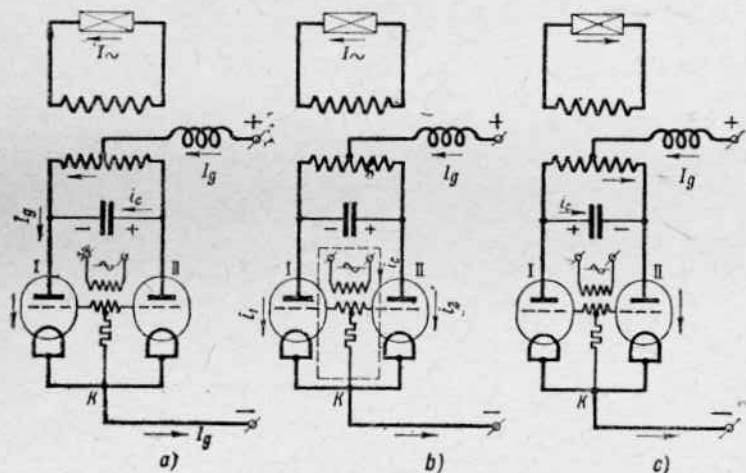
$$2e_r = \frac{mI_g X_a}{\pi}.$$



Фиг. 167. Графическое определение угла перекрытия.

Найдя затем точку косинусоиды, соответствующую этой суммарной ординате, мы легко определяем искомый угол перекрытия $\gamma = \Delta\alpha$.

б) Коммутация посредством емкости. В тех случаях, когда цепь переменного тока является лишь цепью потребления без независимого



Фиг. 168. Коммутация посредством емкости. а — ток проходит через прибор I; б — период коммутации; с — ток проходит через прибор II.

источника э. д. с. (фиг. 168), роль коммутирующего тока может быть возложена на разрядный ток конденсатора, включаемого тем или иным

путем в цепь переменного тока инвертора. На схеме фиг. 168 конденсатор включен параллельно обмоткам трансформатора. При данной схеме коммутация происходит в следующем порядке:

При прохождении тока через одну полуобмотку и прибор *I* (фиг. 168, *a*) конденсатор благодаря возникающей э. д. с. самоиндукции в обмотке заряжается на правой обкладке положительным, а на левой — отрицательным зарядом. При открытии сеткой прибора *II* (фиг. 168, *b*) конденсатор разряжается, давая коммутирующий ток, сводящий к нулю ток в первом приборе. Ток в приборе *II* при этом возрастает до нормальной величины. При возрастании тока в приборе *II* конденсатор, перезаряжаясь (фиг. 168, *c*), подготавливает условия для коммутации тока в следующий полупериод. Частота тока коммутации определяется частотой сеточного напряжения. Форма тока находится в большой зависимости от величины емкости, включенной в контур для коммутации, а также от индуктивности трансформатора и сопротивления в цепи нагрузки [Л. XIV, 7].

с) Деионизация и предельные углы регулирования. Для того чтобы сетка могла препятствовать горению дуги в период, когда данный анод становится положительным по отношению к аноду, вступающему в работу, необходимо не только полное прекращение дугового разряда на данном аноде, но и исчезновение до определенного минимума оставшихся от дуги ионов. Требующееся для этого время было определено нами в § 37 как время деионизации и измерено временем $T = m\tau$, где τ — постоянная времени деионизации, а m — число постоянных времени, зависящее от сеточных потенциалов и параметров сетки.

В переводе на угловое измерение в градусах мы получаем для периода деионизации угол

$$\theta = 57,3 \omega T.$$

Угол деионизации θ и угол коммутации γ являются теми углами, на которые должен быть уменьшен отмеченный нами выше максималь-

ТАБЛИЦА 30
Значения предельных углов регулирования
с учетом периода коммутации и деионизации

I_g в А	γ в градусах	θ в градусах	$\alpha_{\max}$ в градусах
100	4,2	5,8	170
200	7,3	8,7	164
300	9,1	11,9	159

ный угол регулирования $\alpha = 180^\circ$ (определенный нами без учета периода коммутации и деионизации). Реально максимальным углом регулирования является, таким образом, угол

$$\alpha_{\max} = 180^\circ - \gamma - \theta, \quad (\text{XIV}, 6)$$

отсчитываемый от точки естественного зажигания при выпрямлении тока.

Для ориентации в величинах γ и θ в табл. 30 приведены значения этих углов, полученных по опытным исследованиям автора на инверторной установке с ртутным преобразователем типа РВ-10, работавшего в шестифазной схеме, с трансформатором 1000 kVA, $\epsilon_k = 8\%$, 6 600/500 V при нескольких нагрузках [Л. XIV, 8].

При превышении указанных в таблице значений угла $\alpha_{\max}$ в инверторной схеме возникает, как указывалось выше, короткое замыкание.

90. Внешние характеристики инвертора

Внешние характеристики преобразователя представляют собой зависимость напряжения на клеммах преобразователя от тока нагрузки $U_g = f(I_g)$.

Это напряжение суммируется:

1) из среднего значения рабочего участка кривой переменного напряжения, определяемого по формуле (XIV, 1),

$$E_g = \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} \cos \alpha = E_{g0} \cos \alpha;$$

2) из индуктивного падения напряжения (XII, 20')

$$e_g = \frac{I_g X_a}{\frac{2\pi}{m}};$$

3) омического падения напряжения в обмотке трансформатора;

4) из падения напряжения в дуге инвертора.

Пренебрегая двумя последними слагаемыми, из-за их относительно незначительной величины, мы для внешнего напряжения генератора получаем выражение

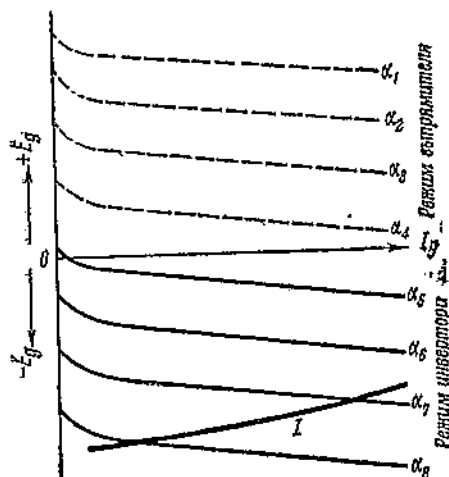
$$U_g = E_{g0} \cos \alpha - \frac{m}{2\pi} I_g X_a = \frac{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} \cos \alpha - \frac{m}{2\pi} I_g X_a. \quad (\text{XIV}, 7)$$

Второе слагаемое в этой сумме взято со знаком минус, поскольку и первое слагаемое имеет отрицательный знак, так как $\alpha > 90^\circ$.

Получающийся общий отрицательный знак для E_g показывает, что напряжение на инверторе противоположно по знаку напряжению при работе преобразователя на выпрямительном режиме.

Строя по уравнению (XIV, 7) внешние характеристики для разных углов регулирования α , начиная от $\alpha = 0$ до $\alpha = 180^\circ$, мы получаем семейство прямых, наклоненных к оси абсцисс под одним и тем же углом (фиг. 169). Положительные характеристики на этом рисунке отвечают режиму выпрямления тока, а отрицательные — инверторному режиму.

Характеристики выпрямителя с ростом нагрузки идут на понижение, а характеристики инвертора идут на повышение. Это является следствием отмеченного выше факта, что изменение хода кривой переменного напряжения в процессе коммутации тока ведет при выпрямлении тока к потере напряжения, а при инвертировании тока — к повышению среднего значения напряжения.



Фиг. 169. Внешние характеристики преобразователя.

При малых нагрузках характеристики теряют прямолинейность, получая участки с резким повышением напряжения, при малом изменении тока. Это объясняется тем, что при малых нагрузках из-за недостаточной величины энергии, запасаемой в дроссельной катушке инвертора, кривые тока делаются прерывистыми (§ 84). При схеме трансформатора с катушкой Кюблера скачок напряжения еще усиливается переходом работы инвертора с трехфазного режима на шестифазный (§ 83). На фиг. 169 нанесена также одна из возможных внешних характеристик генератора, питающего преобразователь (прямая I). Эта характеристика дана в виде прямой с небольшо-

шим наклоном при возрастании нагрузки (характеристика шунтового генератора).

Точки пересечения внешней характеристики генератора с внешними характеристиками инвертора показывают, как надо изменять угол регулирования преобразователя при данной внешней характеристике генератора и при заданном диапазоне изменения нагрузочного тока [Л. XIV, 10].

91. Коэффициент мощности инверторной установки

Определяя коэффициент мощности по отношению активной мощности, поступающей от инвертора в сеть переменного тока P_a , к кажущейся мощности, поступающей в эту сеть [Л. XIV, 9], мы имеем

$$\lambda = \frac{P_a}{P_1} = \frac{P_a}{m_1 I_1 U_1}, \quad (\text{XIV, 8})$$

где I_1 и U_1 — ток и напряжение фаз первичной обмотки трансформатора. Если пренебречь внутренними потерями энергии и индуктивным падением напряжения в установке, то мы можем написать

$$P_a = P_g = U_g I_g = -E_{q0} I_q \cos \alpha^1. \quad (\text{XIV, 9})$$

¹ Знак минус перед E_{q0} взят нами потому, что U_g и E_{q0} противоположны по своему направлению в контуре.

Значения I_1 и U_1 в формуле (XIV,8) мы можем определить через I_g и E_{g0} , пользуясь соотношениями (XII,22). Подставляя значения для P_a и I_1 и U_1 в формулу, мы получаем

$$\lambda = -\frac{E_{g0} I_g \cos \alpha \cdot a \cdot b}{m_1 E_{g0} I_g} = -\frac{\cos \alpha \cdot a \cdot b}{m} = -B \cos \alpha. \quad (\text{XIV}, 10)$$

Здесь B — константа с численным значением, зависящим от выбранной схемы трансформатора, а при учете коммутации и от угла перекрытия. Формула (XIV, 10) показывает, что коэффициент мощности пропорционален $\cos \alpha$.

Установленную связь легко пояснить графически. Действительно, поскольку амплитуда основной волны кривой тока при разложении кривой в ряд Фурье совпадает с осью прямоугольника фазового тока, а косинус угла между амплитудами основной волны тока и напряжения определяет нам коэффициент сдвига в сети переменного тока, то ясно, что, сдвигая на угол α прямоугольник тока по отношению к полуволне напряжения, мы тем самым уменьшаем коэффициент мощности пропорционально $\cos \alpha$. Стремясь к высокому коэффициенту мощности инверторной установки, мы должны, следовательно, обеспечить работу такой установки при углах α , возможно более близких к 180° .

92. Регулирование преобразовываемой мощности

Активная мощность, принимаемая сетью переменного тока, должна быть равна мощности, передаваемой из сети постоянного тока, если пренебречь внутренними потерями в преобразователе

$$P_a = P_g = U_g I_g. \quad (\text{XIV}, 11)$$

Это соотношение показывает, что регулирование передаваемой мощности может быть произведено либо изменением U_g , либо I_g , либо путем совместного изменения обеих указанных величин.

Анализируя формулы (XIV,6) и (XIV,7), мы видим, что при регулировании преобразовываемой мощности при неизменной величине тока I_g мы должны одновременно с постоянным напряжением U_g менять среднее значение переменного напряжения E_g с тем, чтобы разность этих величин оставалась все время величиной неизменной, равной $\frac{m I_g X_a}{2\pi}$. Практически изменение E_g осуществляется путем воздействия

на угол сеточного регулирования α , изменение же U_g производится путем воздействия на ток возбуждения генератора. Этот способ регулирования оперативно не всегда удобен, так как при регулировании мощности приходится воздействовать сразу на два различных органа управления. Манипуляции по регулированию мощности упрощаются, если допустить в известном диапазоне изменение тока и взять генератор с противокомпаундным возбуждением. Увеличение тока при уменьшении угла α (поскольку противодействующее переменное напряжение E_g уменьшается) ведет в этом случае к автоматическому уменьшению напряжения на генераторе U_g . Подбором характеристик при такой си-

стеме возбуждения можно добиться регулирования мощности в требуемом диапазоне только регулированием угла α [Л. XIV, 10]. Недостатком данного способа регулирования мощности является то, что с уменьшением угла регулирования α коэффициент мощности установки (§ 91) заметно ухудшается.

Другой способ регулирования мощности заключается в том, что мы сохраняем максимально возможное значение для E_g (оставляя без изменения угол α) и регулируем ток, изменяя возбуждение генератора. Хотя в отношении коэффициента мощности этот способ дает наиболее благоприятные результаты, но практически он также неудобен, так как при этом способе регулирования требуемые изменения тока возбуждения весьма малы.

Это видно из формулы (XIV, 7), в которой из-за относительно малого численного значения второго слагаемого в правой части значительным изменениям тока I_g соответствуют незначительные изменения в величине U_g , определяемой током возбуждения генератора.

93. Характеристики предельных нагрузок инвертора

Мы знаем, что нормальная работа инвертора возможна только до тех пор, пока [см. (XIV, 6)]

$$\alpha + \gamma + \theta \leq 180^\circ.$$

Если данное неравенство нарушается, то в инверторной схеме происходит короткое замыкание.

Рассматривая условия предельной нагрузки инвертора и пренебрегая углом деионизации θ , который от нагрузки мало зависит, мы можем записать, что предельный режим нагрузки мы получаем тогда, когда

$$\alpha + \gamma = 180^\circ. \quad (\text{XIV}, 12)$$

Подставляя значение γ из этого равенства в уравнение (XIV, 5'), мы получаем, что

$$1 + \cos \alpha = \frac{I_g X_a}{\sqrt{2} E_a \sin \frac{\pi}{m}}. \quad (\text{XIV}, 13)$$

Это уравнение показывает, что каждому значению переменного напряжения E_a и углу зажигания α отвечает по условиям коммутации вполне определенный предельный ток нагрузки I_g .

Если значение этого тока будет превышено, то, как это следует из формулы (XIV, 5'), угол γ при заданных E_a и α будет больше того значения, которое допускается равенством (XIV, 12), т. е. коммутация не успеет во-время закончиться, и нормальный режим работы перейдет в короткозамкнутый.

Так как рабочий ток через инвертор при заданной величине U_g меняется как вследствие изменения угла регулирования α , так и вследствие изменения E_a , то из формулы (XIV, 13) мы заключаем, что к предельному значению тока, называемому нами критическим током $I_{кр}$, мы можем прийти двояким путем:

- 1) или путем изменения угла α при неизменном значении E_2
- 2) или путем изменения E_2 при неизменном значении угла зажигания α .

Определив из формулы (XIV,7) значения напряжения на преобразователе $U_{g\kappa p}$, соответствующие критическим значениям тока $I_{\kappa p}$:

1) при переменном угле α и 2) при переменном значении E_2 , мы приходим к двум характеристикам инвертора:

$$U_{g\kappa p} = f(I_{\kappa p}) \quad \text{при } E_2 = \text{const},$$

$$U_{g\kappa p} = \varphi(I_{\kappa p}) \quad \text{при } \alpha = \text{const},$$

определяющим предельные величины нагрузок преобразователя.

Первую характеристику мы получим, если значение $\cos \alpha$, получаемое из формулы (XIV,13),

$$\cos \alpha = \frac{I_g X_a}{\sqrt{2} E_2 \sin \frac{\pi}{m}} - 1$$

мы введем в формулу (XIV,7), заменив I_g через $I_{\kappa p}$, тогда мы получаем

$$U_{g\kappa p} = -E_{g0} + \frac{m I_{\kappa p} X_a}{2\pi}. \quad (\text{XIV, 14})$$

Данному уравнению $U_{g\kappa p} = f(I_{\kappa p})$ отвечает прямая KF из фиг. 170. Вторую характеристику мы получаем, если значение E_2 , получаемое из формулы (XIV,13)

$$E_2 = \frac{I_g X_a}{\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{m} (1 + \cos \alpha)},$$

мы введем в формулу (XIV,7).

Тогда мы получаем

$$U_{g\kappa p} = \left(\frac{2 \cos \alpha}{1 + \cos \alpha} - 1 \right) \frac{m \cdot X_a}{2\pi} I_{\kappa p} = A I_{\kappa p}. \quad (\text{XIV, 15})$$

При заданном угле регулирования α A есть величина постоянная. Последнему уравнению на фиг. 170 отвечает прямая OF . Угол, к которому эта прямая относится, обозначен на этом рисунке через α_F .

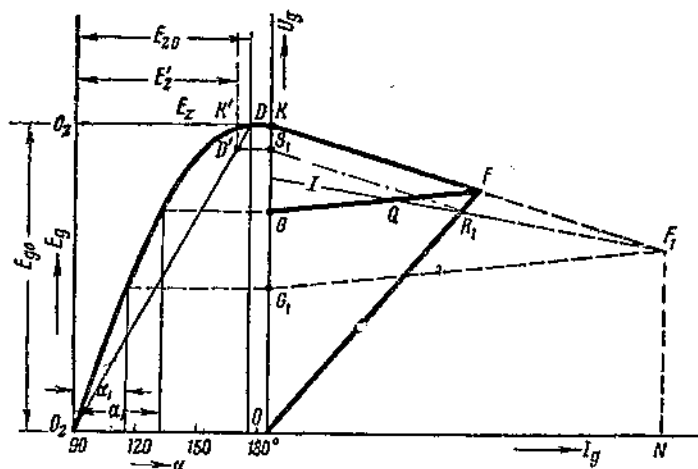
Для графического определения величины $E_g = E_{g0} \cos \alpha$ при различных значениях угла α на левой половине диаграммы фиг. 170 построена косинусоида, характеризующая в определенном масштабе зависимость E_g от угла α .

По заданной внешней характеристике генератора и внешним характеристикам преобразователя мы можем найти точки перехода к короткому замыканию инвертора при различных условиях нагрузки. Так, по точке пересечения внешней характеристики генератора (кривая I на

фиг. 170) с прямой KF (точка F_1 на фиг. 170) мы определяем угол зажигания α_1 , при котором наступает короткое замыкание в контуре; по точке пересечения внешней характеристики генератора с прямой OF (точка R_1 на фиг. 170) мы находим то напряжение E_2' , при котором наступает короткое замыкание в контуре.

Для определения этого напряжения непосредственно по чертежу на левой стороне этого рисунка, кроме косинусоиды, определяющей $E_g = f(\alpha)$, построена прямая O_2D , характеризующая зависимость $E_{g0} = \varphi(E_2)$.

Величина E_2' находится по вспомогательным линиям построения R_1S_1 и S_1D_1' . Прямая R_1S_1 проводится параллельно прямой KF , по-



Фиг. 170. Диаграмма предельных нагрузок преобразователя.

скольку данная пограничная прямая, как это следует из формулы (XIV,14), при снижении переменного напряжения E_2 перемещается параллельно самой себе вниз.

Общая точка пересечения прямых OF и KF с внешней характеристикой, построенной для заданного угла зажигания α (точка F на фиг. 170), определяет переход к режиму короткого замыкания вследствие повышения возбуждения генератора постоянного тока. При таком повышении внешняя характеристика генератора перемещается параллельно самой себе вверх.

Пользуясь диаграммой фиг. 170, построенной по параметрам исследуемого инвертора, мы имеем возможность выяснить все предельные условия нагрузок для него.

94. Работа инвертора на режиме рекуперации энергии

Инвертирование тока ионными приборами открыло возможность широко пользоваться рекуперацией энергии в тех силовых установках, в которых режим работы механического привода, вращаемого моторами

постоянного тока, таков, что моторный режим электрической машины перемежается с генераторным режимом, получаемым или за счет работы сил тяжести (спуск груза грузоподъемными кранами, движение поезда по уклону) или за счет накопленной живой силы механизма (привод к прокатным станам, торможение поезда).

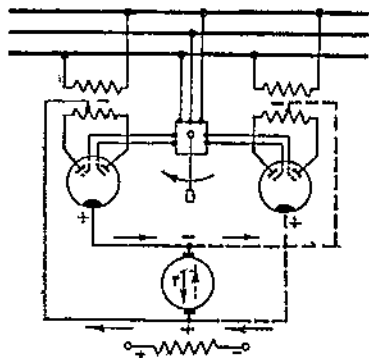
Питая в таких приводах машину постоянного тока при работе ее на моторном режиме через выпрямитель, мы можем, обращая этот выпрямитель в инвертор, каждый раз, когда это требуется по рабочему режиму, передавать энергию, преобразованную из механической в электрическую, в сеть переменного тока. Это может быть сделано при помощи одного преобразователя путем переключения его в нужный момент при помощи реле и переключателей или же путем изменения полярности источника постоянного тока. Но значительно более удобную и гибкую систему мы получаем, если воспользоваться для этой цели двумя преобразователями, соединенными накрест, как это показано на фиг. 171. Один из преобразователей работает при этом выпрямителем, а другой — инвертором [Л. XIV, 16]. Пользуясь только сеточным управлением, мы обеспечиваем в такой установке не только автоматический переход работы с моторного режима на генераторный и наоборот, но и можем в любой момент времени изменять направление вращения машины, если это требуется по режиму работы установки. К таким устройствам относятся тяговые приводы, приводы грузоподъемных устройств, приводы к прокатным станам. В частности, преобразовательным комплектом, схема которого изображена на фиг. 171, может быть заменен мотор-генератор, питающий приводной двигатель в схеме Леонарда.

Ртутные преобразователи в схеме фиг. 171 — двуханодные. При более мощных приводных агрегатах могут быть взяты шести- и двенадцатианодные преобразователи.

Сеточное управление обоих преобразователей, показанных на фиг. 171, заблокировано так, что при работе одного из преобразователей выпрямителем другой может работать инвертором тогда, когда напряжение в цепи постоянного тока становится выше, чем то напряжение, которое дает выпрямитель.

При неуправляемых выпрямителях такое соединение было бы невозможно, так как оно означало бы короткое замыкание одного выпрямителя на другой.

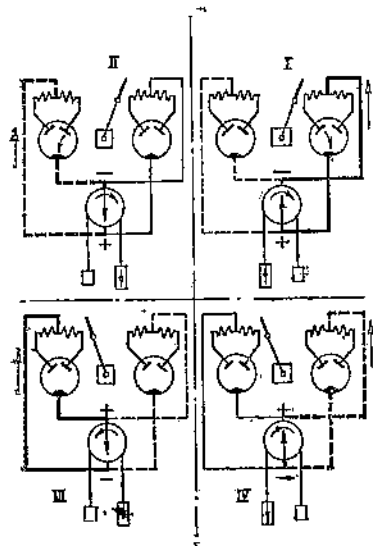
Машина постоянного тока в этой схеме имеет независимое возбуждение и поэтому при одном и том же направлении вращения независимо от того, работает ли машина мотором или генератором, э. д. с., индуцируемая в якоре машины, имеет одно и то же направление. Направление же тока, протекающего в машине при переходе с моторного режима на



Фиг. 171. Схема преобразовательной установки для рекуперации энергии.

генераторный, изменяется. Следовательно, изменяется и направление вращающего момента машины, активный момент у мотора превращается в реактивный момент у генератора.

Механический режим работы машины постоянного тока при четырех возможных вариантах работы преобразователя условно показан на фиг. 172 направлением движения более тяжелого из двух грузов, висящих на блоке машины. При подъеме этого груза машина работает мотором, при спуске машина работает генератором. Два верхних рисунка на фиг. 172 соответствуют вращению машины в одном направлении; два нижних рисунка — вращению машины в противоположном направлении.



Фиг. 172. Диаграмма четырех режимов работы преобразовательной установки.

Изменение направления вращения производится рычагом сеточного управления, переставляемого из правого положения в левое.

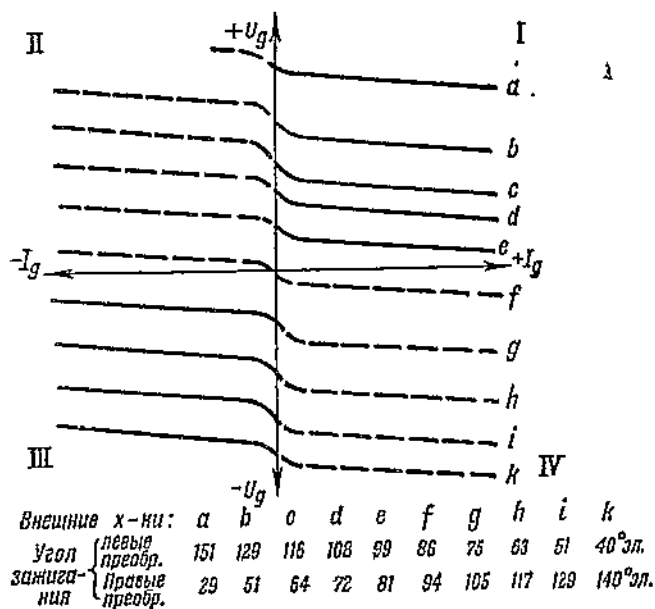
В первом квадранте машина работает мотором, питаясь током от правого преобразователя, который в этом случае работает выпрямителем. Переводя рычаг постепенно все в более крайнее положение направо, мы тем самым ускоряем ход мотора, так как повышаем выпрямленное напряжение. Этот режим работы определяется семейством характеристик, нанесенных в квадранте I фиг. 173. Правый преобразователь, поставленный сетками на работу в качестве инвертора, при этом режиме тока не пропускает, так как развиваемое им противодействующее переменное направление E_g больше э. д. с. машины постоянного тока. Только тогда, когда машина постоянного тока, освобожденная от моторной нагрузки, под действием внешнего механического момента увеличивает свою скорость, ее э. д. с. повышается,

инвертор вступает в работу и машина переходит на генераторный режим (квадрант II, фиг. 172). Одновременно прекращает свою работу выпрямитель, так как его напряжение делается меньше, чем U_g . На инверторном режиме работа определяется семейством характеристик, помещенных в квадранте II фиг. 173. По мере того как под действием тормозящего генераторного момента замедляется ход машины, рычаг сеточного управления из крайне правого положения перемещается ближе к среднему положению. Это соответствует переходу по семейству характеристик инвертора вниз. Инвертирование тока при этом возможно почти до полной остановки машины.

При переводе рычага из нулевого положения влево направление вращения машины меняется, и левый преобразователь начинает работать выпрямителем. Этот режим работы иллюстрируется схемой и кривыми в квадранте III фиг. 172 и 173. Переход при данном вращении машины на генераторную работу, при которой правый преобразователь всту-

пает в работу как инвертор, иллюстрируется схемой и диаграммой квадранта IV на фиг. 172 и 173.

Углы регулирования, отвечающие сопряженным характеристикам преобразователя, обозначенным на фиг. 173 одной и той же буквой, указаны для обоих преобразователей на той же фиг. 173. Эти цифры относятся к двухфазному преобразователю.



Фиг. 173. Внешние характеристики при работе преобразователя по схеме фиг. 7.

Такой сопряженный преобразователь, как показали опытные исследования автора, с успехом заменяет агрегаты вращающихся машин, применяемых при рекуперации энергии в тяговых и грузоподъемных установках.

95. Преобразование одного вида переменного тока в другой

Преобразование одного вида переменного тока в другой может быть совершено двумя способами:

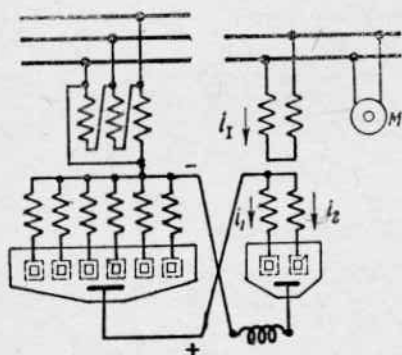
1) переменный ток, подлежащий преобразованию, вначале выпрямляется и затем при помощи инвертора постоянный ток вновь превращается в переменный [Л. XIV, 40, 42];

2) преобразование совершается непосредственно без участия промежуточного звена постоянного тока [Л. XIV, 20].

При первом способе преобразования мы получаем связь систем, допускающую изменение частот и фаз в сетях переменного тока, связанных преобразователем (упругая связь).

При втором способе мы большей частью получаем жесткую связь систем с постоянным отношением частот и с мало изменяющимся сдвигом фаз в связанных сетях.

а) Преобразователь упругой связи систем. Типичным примером упругой связи систем является схема преобразования, показанная на фиг. 174, в которой трехфазный ток промышленной частоты (50 Hz) преобразовывается в однофазный ток тяговой частоты ($16 \frac{2}{3}$ Hz). В этом случае трехфазный преобразователь ра-



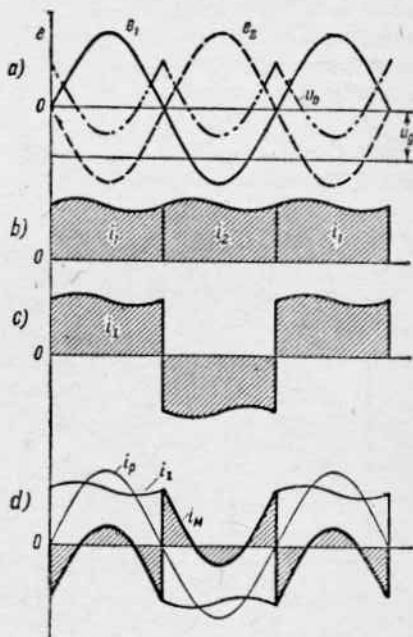
Фиг. 174. Схема преобразования трехфазного тока в однофазный с промежуточным звеном постоянного тока.

ботает как выпрямитель, а однофазный преобразователь — как инвертор.

При соответствующем изменении углов зажигания у анодов преобразователей мы можем получить и обратный поток энергии из сети однофазного тока в сеть трехфазного тока.

Так как мгновенная мощность, приходящая из сети трехфазного тока в цепь выпрямленного тока, во времени не меняется, а мгновенная мощность, отбираемая сетью однофазного тока, пульсирует, то в промежуточной цепи постоянного тока должен находиться уравниватель мгновенных значений мощности.

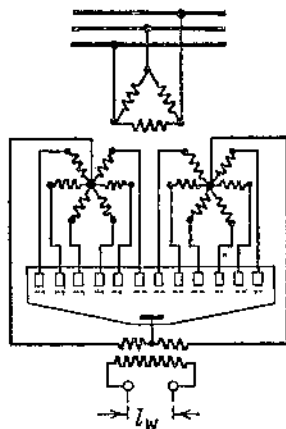
В схеме фиг. 174 одним из составных элементов такого уравнивателя мощности является дроссельная катушка, принимающая на себя разницу в напряжениях (фиг. 175, а) между выпрямленным (кривая U_g) и синусоидальным, получаемым со стороны инвертора (e_1 или e_2). Благодаря наличию дроссельной катушки кривые токов во вторичных обмотках трансформаторов, соединенных с анодами выпрямителя и инвертора,



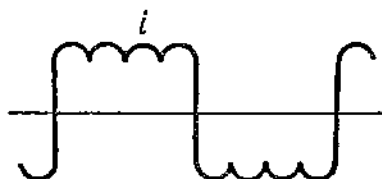
Фиг. 175. Диаграмма напряжений и токов при образовании тока по схеме фиг. 174. а — диаграмма напряжений в однофазном трансформаторе e_1, e_2 , на дросселе U_d и в цепи выпрямленного тока U_g ; б — кривая токов во вторичной обмотке однофазного трансформатора; в — кривая токов в первичной обмотке однофазного трансформатора; г — кривая токов у потребителей в сети однофазного тока (кривая i_p), в первичной обмотке однофазного трансформатора (кривая i_1) и в вспомогательном генераторе (i_m).

имеют почти прямоугольную форму (фиг. 175, *b*). Токи первичной обмотки трансформатора, питающего выпрямитель, даже при этих условиях остаются мало отличающимися от синусоидального тока, поскольку выпрямитель взят многофазным. Между тем, в первичной обмотке однофазного трансформатора, питающего инвертор, форма тока имеет также (прямоугольную) форму, как и в фазах вторичной обмотки (фиг. 175, *c*).

Для того чтобы сохранить в однофазной сети, питающей потребителей, синусоидальный ток, в схеме должна быть предусмотрена специальная машина, принимающая на себя разницу между синусоидальным током потребителей (кривая i_p на фиг. 175, *d*) и током, изменяющимся по кривой прямоугольной формы (кривая i_1 на фиг. 175, *d*). Эта разница представлена кривой i_m на фиг. 175, *d*. Машина является вторым составным элементом уравнивателя мощности на схеме фиг. 174. В результате мы получаем, что для обеспечения синусоидальной формы кривой в однофазной



Фиг. 176. Схема преобразования трехфазного тока в однофазный без промежуточного звена постоянного тока.



Фиг. 177. Кривая однофазного тока при преобразовании по схеме фиг. 176.

сети при сохранении синусоидального напряжения в этой сети нужны два уравнивателя: один для напряжения, роль которого выполняет дроссельная катушка, а другой для тока, роль которого в данной схеме выполняет синхронная машина.

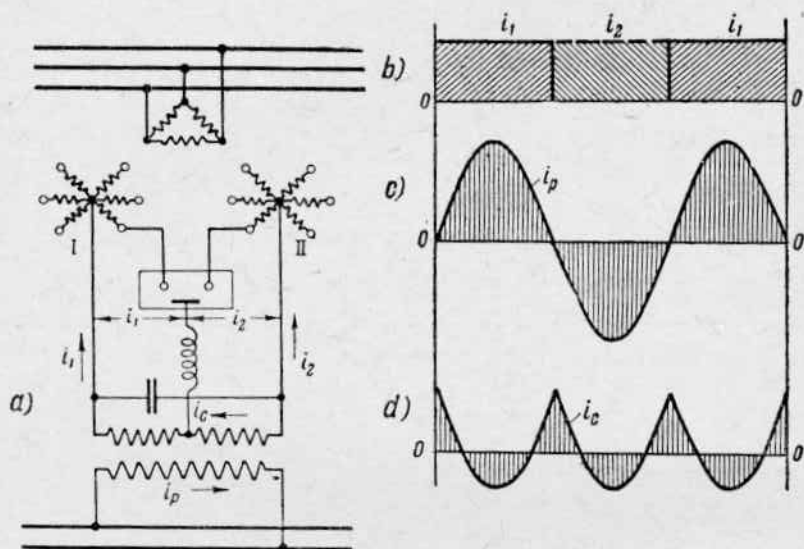
Эта машина служит одновременно и в качестве независимого источника тока, обеспечивающего коммутацию в инверторе. Кроме того, эта машина может в случае нужды служить и генератором реактивной мощности для потребителей, имеющих в сети однофазного тока.

Схема фиг. 174 может быть применена и для передачи энергии на постоянном токе, поскольку в промежуточном звене этой схемы имеется постоянный ток. В расщелку этого звена и включается линия передачи. Выпрямитель в схеме фиг. 174 при этом служит отправительной подстанцией, а инвертор — подстанцией, принимающей энергию на постоянном токе.

Преобразователь жесткой связи систем. Схема такого преобразователя показана на фиг. 176. В этой схеме оба преобразователя работают выпрямителями, причем один из них питает ток вторичную обмотку однофазного трансформатора в течение одной полуволны, а второй — в

втечение другой полуволны. Таким образом работа выпрямителей чередуется по полуволнам переменного тока однофазной сети. Это обеспечивается соответствующим подбором схемы сеточного управления. Кривая тока, получаемая в однофазной сети при таком преобразователе, показана на фиг. 177.

Для превращения такого тока в синусоидальный и в данной схеме кроме уравнивателя напряжений требуется уравниватель для тока. Эреншпергер [Л. XIV, 19] предложил в качестве уравнивателя для напряжений сохранить дроссельную катушку, а в качестве уравнивателя для тока взять конденсатор, включив его параллельно вторичной обмотке трансформатора (фиг. 178, а). Конденсатор в этом случае принимает на себя



Фиг. 178. а — схема преобразования трехфазного тока в однофазный при использовании в качестве уравнивателя энергии индуктивности и емкости; б — диаграмма токов в отдельных ветвях трансформатора; в — диаграмма тока в первичной обмотке трансформатора; д — диаграмма тока в конденсаторе.

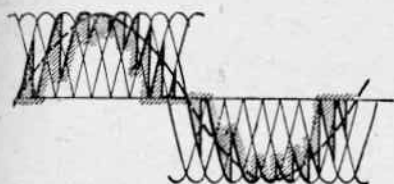
разность тока (кривая i_c на фиг. 178, д) между прямоугольной его формой (кривая i_1, i_2 на фиг. 178, б), получаемой от выпрямителя, и синусоидальной формой тока (кривая i_p на фиг. 178, в), отдаваемого через трансформатор в сеть однофазного тока.

Такая схема имеет то преимущество, что позволяет передавать реактивную мощность из одной сети в другую, а также передавать энергию в сеть однофазного тока при отсутствии в этой сети независимого источника питания. Колебания требуемой периодичности могут быть здесь получены путем настройки в резонанс емкости конденсатора и индуктивности, имеющейся в цепи однофазного тока.

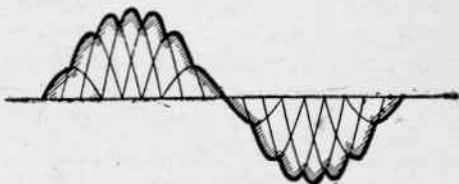
Чтобы избежать применения в схеме двух уравнивателей для тока и напряжения, рядом авторов внесены предложения по видоизменению

основной схемы, данной на фиг. 176. Эти предложения в основном сводятся к тому, чтобы получать непосредственно от преобразователя лучшую форму кривой (ближе подходящую к синусоиде) переменного напряжения.

Так Газельтине (Л.П.1.) предложил сеточное управление выпрямителями сделать таким, чтобы разные аноды имели различные углы зажи-



Фиг. 179. Диаграмма однофазного напряжения при работе преобразователя с различными углами зажигания анодов.

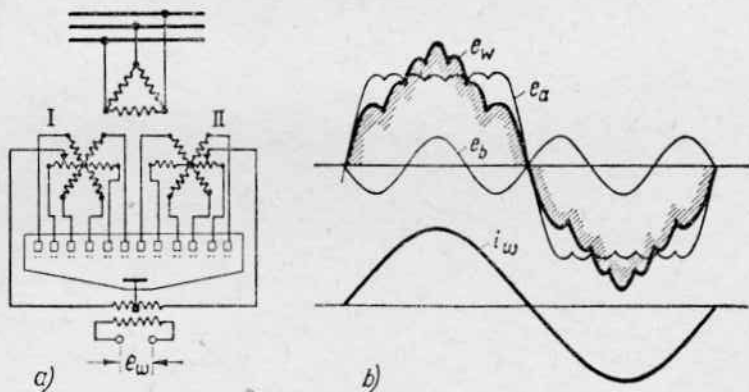


Фиг. 180. Диаграмма однофазного напряжения при работе преобразователя с различными фазовыми напряжениями.

гания, с тем, чтобы получать, таким образом, кривую напряжения, подобную приведенной на фиг. 179.

Недостатком такой схемы является, как видно из этого рисунка, наличие довольно заметных по величине гармонических составляющих в кривой напряжения, накладываются на основную волну напряжения.

Более радикальное изменение в схему внес Лебль [Л.П.1], предложивший выполнять отдельные фазы вторичной обмотки трансформатора



Фиг. 181. Преобразование трехфазного тока в однофазный со смещенной нулевой точкой. *a* — электрическая схема; *b* — линейная диаграмма напряжений и тока i_w .

с разным числом витков с тем, чтобы напряжения отдельных анодов были различны по величине. Это дает возможность, как показывают кривые напряжения на фиг. 180, получать кривую однофазного напряжения в виде огибающей кривой, достаточно близко подходящей к синусоиде.

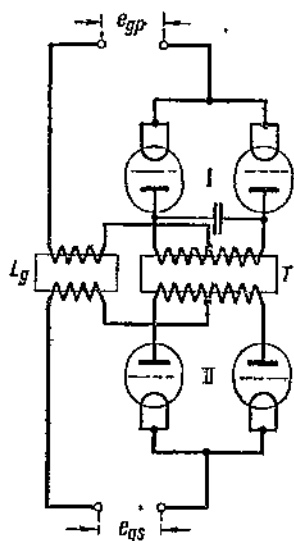
Ионас [Л.П.1], учтя то, что отличие трапециoidalной кривой от синусоиды дает, главным образом, третья гармоническая напряжения, предложил схему, изображенную на фиг. 181,а, в которой недостающая третья гармоническая получается за счет смещения нулевого вывода у вторичных обмоток трансформатора.

Линейные диаграммы напряжений для этой схемы показаны на фиг. 181,б. Кривая e_a на этой фигуре показывает трапециoidalную кривую напряжения, кривая e_b — третью гармоническую напряжения, а e_w — результирующую кривую напряжения, близко подходящую к синусоиде.

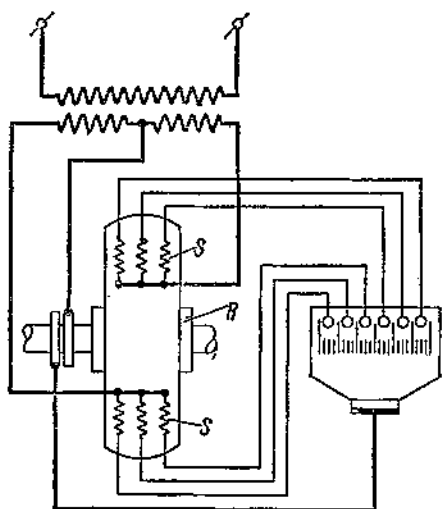
96. Трансформация постоянного тока

Включая инверторно-выпрямительную группу по схеме, изображенной на фиг. 182, мы получаем возможность преобразовывать постоянный ток одного напряжения в постоянный ток другого напряжения.

Такой преобразователь часто называют трансформатором постоянного тока. В этой схеме напряжение преобразовываемого постоянного



Фиг. 182. Схема трансформации напряжений постоянного тока. I — инвертор, II — выпрямитель, T — трансформатор, L_g — дроссельная катушка.



Фиг. 183. Схема вентильного двигателя.

тока подводится к зажимам e_{gr} . Инвертор I преобразовывает постоянный ток в переменный. Последний, трансформируясь в обмотках трансформатора T , выпрямляется затем выпрямителем II . У выходных зажимов мы получаем постоянный ток требуемого напряжения e_{gs} . Конденсатор в схеме инвертора служит для коммутации тока, а дроссель (L_g) служит в качестве уравнивателя напряжений. Индуктивная связь дросселей обеих систем — выпрямительной и инверторной — позволяет компенсировать постоянную составляющую тока в этих дросселях и тем самым уменьшить требуемые размеры железного сердечника [Л.П.1].

97. Ионный прибор в роли коллектора двигателя (вентильный двигатель)

Затруднительность выполнения однофазного коллекторного двигателя, нашедшего себе широкое применение в электрической тяге на нормальную частоту, из-за условий коммутации выдвинула вопрос о замене механического коллектора группой ионных приборов с управляемой сеткой.

Предложенная и разработанная ниже Керном [Л. XIV, 33] схема такого двигателя, названного вентильным двигателем, показана на фиг. 183.

Для того чтобы избежать большого числа вращающихся колец, анодные цепи выпрямителя связаны не с обмоткой ротора R , а с неподвижными статорными обмотками S . Двигатель снабжен двумя отдельными статорными обмотками, для того чтобы, не устанавливая лишнего выпрямителя, тем не менее, использовать обе полуводны переменного тока.

Для уменьшения количества анодов обмотки статора такого двигателя выполнены разрезными. По каждой из секций такой обмотки, связанной со своим анодом, ток проходит только в течение определенной доли периода. Зажигая сетками поочередно один анод за другим, мы создаем в статоре вращающееся магнитное поле, увлекающее за собой ротор, обмотка которого питается постоянным током. Синхронное вращение поля статора и ротора при любой скорости двигателя достигается тем, что щетки контактной шайбы, управляющей сеточными потенциалами, связаны с валом двигателя.

Такой вентильный двигатель может работать при достаточно широком диапазоне частот и может быть построен на высокое напряжение.

Недостатком этого рода двигателей является плохое использование меди в обмотке двигателя.

БИБЛИОГРАФИЯ

К главе II. Выпрямление тока

1. Glaser u. Müller-Lübeck, Einführung in die Theorie der Stromrichte Bd. I, Berlin J. Springer, 1935.
2. Prince D. and F. B. Vogdes, Principles of Mercury Arc Rectifiers and Their Circuits, New-York, Mc Graw-Hill Book Co, 1927.

К главе III. Механические выпрямители

1. Белявский А. Г., Механические выпрямители, Госэнергоиздат, 1933.
2. Васильев, Коммутационный выпрямитель, „Техника связи“, 1935, № 7—8.
3. Hartman I., Le commutateur à jet ondulé et le principe de la commutation à étincelle tolérées, Bul. Soc. Frans. Electriciens, 1936, № 61.

К главе IV. Твердые и жидкие выпрямители

1. Наследов и Неменов, Твердые выпрямители и фотоэлементы, ГТТИ, 1933.
2. Владавский М., Сухие меднозакисные выпрямители и их применение для целей ж.-д. автоблокировки, журнал „Известия электропромышленности слабого тока“, 1934, № 1, стр. 66—76.
3. Владавский М., Установка, содержание и регулировка купроксных выпрямителей при смешанной системе питания, журнал „Сигнализация и связь на ж.-д. транспорте“, 1934, № 6, стр. 20.
4. Гвоздов С., Меднозакисные выпрямительные элементы, „Известия электропромышленности слабого тока“, 1935, № 2, стр. 49—55.
5. Дмитриев Л., Старение купроксных выпрямителей, „Сигнализация и связь на ж.-д. транспорте“, 1933, № 10, стр. 25.
6. Жузе В., Некоторые данные о механизме действия твердых и электронных выпрямителей, „Журнал экспериментальной и технической физики“, 1935, № 5, стр. 33—45.
7. Sirutor, Ein neuer kupfer oxydul Gleichrichter, ETZ, 1934, H. 51, 1255.
8. Drobka P., Aufbau und Anwendungsgebiete der AEG Trockengleichrichter AEG-Mitt., 1935, № 3, стр. 73—5.
9. Тареев Б., Меднозакисные выпрямители, „Электричество“, 1933, № 9.
10. Asada T., Cuprous Oxide Rectifier, Japanese, JI Physic Trans. und Abstracts., 1934, v. 9, № 1, p. 1—25.
11. Baudisch K., Neuerungen im Bau und in der Verwendung von Kupferoxydul-Gleichrichtern, ETZ, 1934, B. 55, № 9, S. 208—11.
12. Böhm H., Automatic Battery Charging with Oxide Rectifiers, ETZ, Bd. 54, № 43, S. 1037—9.
13. Drobka P., Ladung der Hilfsbatterien von Verbrennungsmotor-Fahr-Zeugen, durch Trockengleichrichter, AEG-Mitt., 1936, № 2, S. 56—60.
14. Hugher E., Copper-oxide Rectifiers in Ammeters and Voltmeters. JI. Inst. Elec. Eng., 1934, v. 75, p. 458—62.

15. Kubbe K., Gleichrichter für selbsttätige Ladung von Elektrofahrzeug-Batterien, ETZ, 1934, H. 51, S. 1250-54.
16. Maier K., Neues vom Selen Gleichrichter, ETZ, 1934, Bd. 55. H. 9, S. 221-2.
17. Maier K., Fortschritte in der Verwendung von Selen-Trockengleichrichter, ETZ, 1935, H. 9, S. 5237-8.
18. Güntherschulze A., Elektrische Gleichrichter und Ventile 2. Auflage, Berlin, J. Springer, 1929.
19. Calhane D., Electrolytic Valve Action of Columbium and Tantalum on A. C. Circuits, Trans. Electrochem. Soc., 1934, v. 65, p. 291-9.
20. Schottky W. u. Rothe R., Baumanlage, Handb. der Experimentalphysik, Bd. 13/2.

К главе V. Вакуумные или электронные выпрямители

1. Капцов Н. А., Физические явления в вакууме и разреженных газах, ГТТИ, 1933.
2. Глейзерман А. Б., Электронные лампы, Энергоиздат, 1934.
3. Шаров В. И., Электронные приборы и их техническое применение, КУБУЧ, 1932.
4. Энгель А. и Штенбек М., Физика и техника электрического разряда в газах, т. I, ОНТИ, 1935.
5. Engel und Steenbeck, Elektrische Gasentladungen, Bd. II, Berlin, J. Springer, 1934.
6. Шапошников А. А., Электронные и ионные приборы, КУБУЧ, 1934.
7. Лалиров-Скобло М. Я., Высокий вакуум, ГНТИ, 1931.
8. Круг К. А., Основы электротехники, изд. 1936.
9. Конников В. Л., Справочник по радиолампам, ОНТИ, 1934.

К главе VI. Газотроны

1. Вологдин В. П., Выпрямители, ОНТИ, 1936.
2. Hull A., Fundamental Electrical Properties of Mercury Vapor and Monatomic Gases, Electrical Eng., 1934, November, p. 1435-1442.
3. Hull A., Gas-Filled Thermionic Tubes, Trans. AIEE, v. 47, 1928, № 3.
4. Tonks and Langmuir, A General Theory of The Plasma of an. Arc., Phys. Rev., 1929, v. 34, p. 876.
5. Smith, Ionization of Hg Vapor by Electron Impact, Phys. Rev., 1931, v. 37, p. 808.
6. Маргулис Н. Д., Новые электровакуумные приборы с накалимым катодом в разреженной газе, „Успехи физических наук“, 1933, № 1.
7. Glaser A., Quecksilberdampf-Gleichrichter mit Glühkathode, ETZ, 1931, Bd., 52, № 26.
8. Карпов В. Г., Выпрямительные устройства на газотронах, „Известия электропромышленности слабого тока“, 1933, № 8.
9. Бабаг и Красилов, Газотроны, их устройство и обслуживание, „Техника связи“, 1934, № 7-8.
10. Газотроны. Каталог завода „Светлана“, 1936 г.
11. Steiner A. C., Cable and Maser, Engineering Features of Gas-Filled Tubes, Electrical Engineering, 1932, № 5, v. 51.
12. Кнйеркampf, Steenbeck, Расчет размеров приборов с накалимым катодом, Siemens-Zeitschrift, 1935, Mai, v. 15, p. 189-240 (Special No).
13. Lowry, Thermionic Emission of Oxide Cathode, Phys. Rev., 1920, v. 35, p. 1367.
14. Found, C. G., New Method of Investigating Thermionic Cathodes, Phys. Rev., 1934, v. 45, p. 519.
15. Issendorff, Potential Fall of anod. Zeitschr. f. Phys., 1931, Bd. 67, 7-8.
16. Коваленко В. Ф., Направленный ток и характеристика зондов в ртутной дуге.
17. Knoll, Ollendorf u. Rompe, Gasentladungstabellen, Berlin, 1935.

К главе VII. Тиратроны

1. Hull A., General Electric Rev., 1929, v. 32, № 4, 7. Hot-cathode Thyatrons.
2. Steenbeck, Die Physikalische Grundlagen der Entladungen in Stromrichtern und ihrer Steuerung durch Gitter, Siemens-Zeitschr., Okt. 1933.

3. Glaser, Die physikalischen Grundlagen der Gittersteuerung von Gasentladungsgefassen, Zeitschr. Techn. Phys., 1932, № 11, S. 549.
4. Klempner und E. Lübcke, Steuerbedingungen von Gitter ersteuerten Gasentladungen, Arch. f. El., 1932, H. 26.
5. Hull A., Characteristics and Function of Thyratrons, Phys. Rev., 1933, v. 43, p. 379.
6. Слерпан, Записки по газовому разряду, University of Pittsburg, 1933.
7. Тиратроны с накаливаемым катодом. Каталог завода „Светлана“, 1936.
8. Каранов И. Л. и Уайт Д., Регулирование напряжения сетками в ионных приборах, „Бюллетень ВЭИ“, 1935, № 5.
9. Бабат Г. и Красидов А., Управляемые выпрямители, „Техника связи“ № 4.
10. Büchting und Klempner H., Betrieb und Temperaturreglung von Elektro-Öfen mit Stromrichtern, Siem. Zeitschr., Okt. 1933, Bd. 13, Sonderheft, Teil I, S. 300—303.
11. Bayha H., Regelantriebe mit Stromrichtern, Siem. Zeitschr. Oct. 1933, Bd. 13, Sonderheft, Teil I, S. 303—307.
12. Бабат Г., Тиратроны и их применение в электрической тяге, „Электричество“, 1935, № 10, стр. 14—21.
13. Савицкий В. Л., Сеточная защита ртутных выпрямителей, „Бюллетень ВЭИ“, 1935, № 5 и № 12.
14. Novag M., Voltage Impulses for Thyratrons Grid Control, Gen. Elec. Rev. 1934, Bd. 37, p. 288—95.
15. Hull A., Thyatron voltage Regulator, Gen. El. Rev., 1929, v. 29, p. 390—99.
16. Rolf-Wideröf, Thyatron Tubes in Relay Practice, Trans. AIEE, 1934, v. 53 № 10, p. 1347—53.
17. Whipple C. and Jacobsen W., An Electronic Regulator for an Alternator, El. Eng., June 1935, v. 54, p. 663—7.
18. Watanabe I., New Methods of Controlling Arc Ignition for Hot Cathode Rectifiers, JI. Inst. El. Eng. Japan., 1934, v. 54, № 556, p. 1159—63.
19. Watanabe I. Arc. Ignition Control for Hot-Kathode Rectifiers, JI. Inst. El. Eng. Japan, Nov. 1934, v. 54, p. 1159—63.
20. Stansbury C., Thyatron Control in Industry, El. World, 1934, 27/1, p. 154—58.
21. Stansbury C., A Method of Control for Gas Filled Tubes, El. Eng., 1933, № 52, p. 190—94.
22. Whiteley A., Applications the Hot-Cathode Grid-Controlled Rectifier or Thyatron. 1) Electric Rev., Jan. 3, 1936, v. 116, p. 5—6, p. 50; 2) Elec. Rev. (London), Jan. 10, 1936, v. 118, p. 13; 3) H. Inst. Elec. Engrs, 1933, v. 473, p. 516—39.

К главам VIII, IX, X и XI. Ртутные выпрямители

1. Lüdi F., Ueber den Mechanismus der Elektronenauslösung im Kathodenfleck einer Bogenentladung, Zeitschr. f. Phys., 1933, Bd. 82, S. 815.
2. Lamar E. S. and Compton K., Potential Drop and Ionization at Mercury arc Cathode, Phys. Rev., May 1931, v. 37, p. 1069.
3. Compton K., On the theory of the Mercury Arc., Phys. Rev., May 1931, v. 37, p. 1077.
4. Seeliger E., Der Mechanismus der positiven Säule im einatomigen Gasen. Phys. Zeitschr., 1932, Bd. 33 (7), S. 273.
5. Loebl O., Stromrichter, VDI-Zeitschr., 1933, Bd. 77, S. 605—9.
6. Белявский И., Ртутные выпрямители переменного тока, Энергоиздат, 1933.
7. Hull A., Brown H., Solving the Mystery of Mercury Arc Rectifiers, El. Eng., 1931, v. 50, p. 788—93.
9. Issendorf, Seeliger, Shenkel, Возникновение и борьба с обратными зажиганиями в больших выпрямителях, Wiss. Veröf. aus dem Siemens Konzern, März 1930, Bd. 9, H. 1.

10. Каталог стеклянных выпрямителей завода „Светлана“.
11. Jungmichl, Bau von Stromrichtern mit Quecksilberkathode, Siem. Zeitsch., Oct. 1933.
12. Глазыхов О. Н., Советские ртутные выпрямители, ОНТИ, 1935.
13. Уайт, Положительный столб и его влияние на расчет ртутных выпрямителей (диссертация).
14. Рацер С., Материалы по дипломному проектированию.
15. Савицкий В. Л., Определение падения в дуге ртутного выпрямителя с помощью осциллографа, „Бюллетень ВЭИ“, 1935, № 5.
16. Charles, Relation between Electron Field Emission and Work Fn. of Liquid. Hg., Phys. Rev., 1935, v. 48, p. 260.
17. Barleet, The Mercury Arc Rectifier, GEC, Mai 1932, p. 95—104.
18. Reid E. and Herskind, Single-Unit. high-Curred Rectifier, El. Eng., Oct. 1933, p. 671—74.
19. Дешман, Техника высокого вакуума, перевод с английского ГЭН, изд. 1933 г.
20. Дюнауайе, Техника высокого вакуума. Перевод с французского, ГНТИ, 1931.
21. Технический отчет завода „Электросила“.
22. Moore A. D. Dissipation of Heat by Radiation, Trans. AIEE, 1929.
23. Клячкин Л., Вакуумная техника в ртутных выпрямителях, „Электрификация ж.-д. транспорта“, 1934, № 12, стр. 45.
24. Петухов Е. и Асташев М., Опыты с ртутными выпрямителями, управляемыми посредством сеток, „Электричество“, 1934, № 3, стр. 14—21.
25. Nohag W., Die Verluste und Kühlung der Grossgleichrichter, BBC Nachr., 1933, Bd. 20, № 4, S. 117—22.
26. Dällenbach W., Grossgleichrichter ohne Vakuumpumpe, ETZ, Jan. 25, 1934, Bd. 55, H. 4, S. 85—89.
27. Уайт Д., Экспериментальное исследование температуры анода, Технический отчет ВЭИ 1935 г., инв. № 308-01.
28. Baudisch K. and Keukert W., Mercury Arc Rectifiers for Heavy Current Loads, ETZ, Oct. 1935, Bd. 56, S. 1141—3, S. 1197—1202.
29. Calverley J. E., and Evans W. R., A glass Bulb Rectifier Equipment with Static Grid Control, The English El. Journ., 1934, v. 7, № 2, p. 29—34.
30. Gauster W., Neue Entwicklungsarbeiten und Erfahrungen über Glasgleichrichtern, E. u. M., 1935, № 12, S. 186—9.
31. Siemens A., Der konstruktion Aufbau von Stromrichteranlagen mit Glasgefässen, Siem. Zeitschr., Oct. 1933, Bd. 13, Sonderheft, Teil 1, S. 272—75.
32. Marti O., Grid Control of Mercury Arc Rectifiers, El. World, 1933, v. 102, № 16, p. 507—09.
33. Meiners G., Ein Regulierverfahren für Glas und Eisengleichrichteranlagen, E. u. M., 1933, Bd. 51, № 38, S. 502—5, № 39, S. 511—14.
34. Seletzky und Shevki S. T., Gitter und Anodenströme in einem gittergesteuerten Quecksilberdampf Entladungsgefäß, E. u. M., 1934, Bd. 52, H. 14, S. 165.

К главе XII. Схемы питания ртутных выпрямителей

1. Марти и Виноград, Ртутные выпрямители большой мощности, Перевод Альбана, Госжелдориздат, 1933.
2. Rissik H., Mercury Arc Current Convertors, Pitman, 1935.
3. Müller-Lübeck K., Der Quecksilberdampf-Gleichrichter, B. I, Berlin, 1926 г. и B. II, Berlin, 1929.
4. Кугушев А. М., Электрическое питание радиоустройств, Кубуч, 1935.
5. Круг К. А., Электромагнитные процессы в установках с управляемыми ртутными выпрямителями, ОНТИ, 1935 г.
6. Uhlmann E., Zur Theorie des Gleichrichtertransformatoren, E. u. M., 1936, Bd. 54, № 11, S. 121—7.
7. Uhlmann E., Die Strom- und Spannungsverhältnisse der gittergesteuerten Gleichrichter, Arch. f. El., 1933, Bd. 27, H. 5, S.
8. Uhlmann E., Die Verbesserung des Leistungsfaktors der gittergesteuerten Gleichrichter mittels zusätzlicher Anode, E. u. M., 1933, Bd. 51, № 50, S. 649—51.

9. Uhlmann E., Der Parallelbetrieb von gittergesteuerten Gleichrichtern, Arch. f. El., 1933, Bd. 27, № 8, Aug. 1, S. 586—596.
10. Stout M., Analysis of Rectifier Circuits, El. Eng., Sept., 1935, v. 54 p. 977—84.
11. Фетисов Н. М. и Соловьев В. А., Сглаживание пульсаций напряжения в ртутных выпрямителях, Трансжелдориздат, 1933.
12. Rissik H., Influence of Mercury Arc Rectifiers on the Power Factor of the Supply System, IEE. Jl., May, 1933, p. 435—55.
13. Meyer—Delius H., Die Oberwellen der Gleichspannung und des primären Netzstromes in Gleichrichteranlagen, ETZ, 1933, Bd. 54, № 40.
14. Pohl R., Belastbarkeit von Generatoren bei Betrieb auf Stromrichter, E. u. M., 1935, № 17, S. 193—6.
15. Müller—Lübeck K. und Uhlmann E., Die Strom und Spannungsverhältnisse der gittergesteuerten Gleichrichter, Arch. f. El., May 3, 1933, Bd. 27, № 5, S. 347—73.
16. Lenkert W., Regelantriebe mit Stromrichtern für konstantes und quadratisch ansteigendes Moment, Stelm. Zeit. Sonderheft, 1935, 2 Teil, S. 220—6.
17. Klemperer H. und Steenbeck, Der Stromrichter bei kapazitiver Last, Arch. f. El., 1933, Bd. 27, № 7, S. 485—8.
18. Kettner K., Die Regelvorgänge in selbsttätigen Ladeanlagen mit gittergesteuerten Gleichrichtern, AEG-Mitt., 1936, № 2, S. 60—3.
19. Deuzel P., Gittergesteuerter Sechsenphasen Gleichrichter mit und ohne Glättungseinrichtungen, AEG-Mitt., 1935, № 12, S. 381—3.
20. Cox W., Automatic Control of Mercury Arc Rectifiers, GEC. Jl., Aug. 1933, v. 4, p. 175—86.
21. Bedford B. u. Edliss, Rectifier characteristics with interphase commutation, Gen. El. Rev., 1935, № 11, p. 499—504.
22. Понятковский Б., Особенности определения сдвига фаз, создаваемого выпрямителем, „Техника связи“, 1936, № 11, стр. 35—7.
23. Петров, Электродинамические усилия в обмотках трансформаторов для ртутных выпрямителей, „Бюллетень ВЭИ“, 1935, № 5, стр. 41—6.
24. Марквардт Е. и Гусаков В., О токах короткого замыкания в трансформаторах для ртутных выпрямителей, „Бюллетень ВЭИ“, 1935, № 5, стр. 47—51.
25. Карповский А., О снятии тока напряжения с внешней характеристики холостого хода ртутного выпрямителя, „Электрическая тяга“, 1934, № 5, стр. 23—25.
26. Бабат Г., Исследование управляемых выпрямителей с буферным вентилем, „Известия электропромышленности слабого тока“, 1935, № 6.
27. Бабат Г., О расчете автотрансформаторов выпрямительных установок, „Электричество“, 1935, № 1, стр. 34—6.
28. Бабат Г., Новые схемы управляемых выпрямителей, „Известия электропромышленности слабого тока“, 1934, № 7 и 8.
29. Бабат Г., Многофазные схемы управляемых выпрямителей с буферными анодами и разьединительными дросселями, „Известия электропромышленности слабого тока“, 1935, № 2, стр. 42—9.
30. Бабат Г., Каскадные схемы управляемых выпрямителей, „Известия электропромышленности слабого тока“, 1934, № 9, стр. 67.

К главе XIII. Игнитрон и выпрямитель с дугой в атмосфере

1. Knowles D. and Bangratz E., Ignitron, El. Jl., Dec., 1933, v. 30, № 12, p. 501—3.
2. Ludwig and Maxfield, An Experimental Ignitron Rectifier, 1) El. Eng., 1934, v. 53, № 1, p. 75—86, № 3, p. 488—9; 2) Trans. AIEE, 1934, v. 53, № 4, p. 602—8.
3. Silverman Y., High-Power Welding Rectifier (the Ignitron), El. Eng., Oct 1934, v. 53, p. 1380—3.
4. Slepian J. a Ludwig L., New Method of Starting an Arc, 1933, v. 52, № 9; p. 693, AIEE.
5. Wagner C. a Ludwig L., The Ignitron Type of Inverter, Trans AIEE, 1934, v. 53. № 10, p. 1384—89.

6. Уайт Д. и Мелешкина Л., Стеклянный инвайтрон, „Бюллетень ВЭИ“, 1935, № 12, стр. 15—20.
7. Marx E., New Rectifier for High-Voltage Transmission, Elec. Rev., Jan., 1933, v. 112, № 2871, p. 6.
8. Marx E. a Buchwald H., Marx Arc Rectifier, ETZ, 1934 30/8, p. 861—63, VDI, 1934 16/VI, p. 5737.
9. Thompson W., The Application of a Gas Cooled Arc to Current Conversion with Special Reference to the Marx-type Rectifier, IEE. J., 1934, v. 75, № 455, p. 603—630.
10. Buchwald H., Der Marx-Stromrichter, VDI, 1934, Bd. 78, № 24, S. 737—41.
11. Buchwald H. Lichtbogenzündung beim Marx-Stromrichter, VDI, 1935, № 15, S. 452.

К главе XIV. Инвентирование и двухстороннее преобразование тока

1. Беляев М., Условия работы двигателя постоянного тока, питаемого от однофазной сети переменного тока нормальной частоты через управляемый ртутный выпрямитель, „Электричество“, 1935, № 6, стр. 33—8.
2. Бамдас А. и Беляев В., Схема Скотта (применение ее для преобразования трехфазной системы в двухфазную), „Электричество“, 1935, № 19, стр. 42—5.
3. Губанов М., Процесс рекуперации схемы с вентильным двигателем, „Электрическая тяга“, 1935, № 4, стр. 20—8.
4. Губанов М., Работа и регулирование скорости вентильного двигателя, „Электричество“, 1933, № 12, стр. 5—14.
5. Жарков К., Вентильный агрегат с машиной постоянного тока для шахтного подъема, „Бюллетень ВЭИ“, 1934, № 2, стр. 7—11.
6. Завалишин Д., Новые схемы вентильных двигателей, „Электричество“, 1936, № 3, стр. 6—13.
7. Каганов И. и Котылев М., Преобразование нонными приборами постоянного тока в переменный, „Бюллетень ВЭИ“, 1935, № 5, стр. 16—27.
8. Каганов И. и Котылев М., Коммутация при преобразовании тока нонными приборами, „Электричество“, 1935, № 18, стр. 29—31.
9. Каганов И. и Котылев М., Передача мощности на цепи постоянного тока в цепь однофазного тока, „Бюллетень ВЭИ“, № 12, 1935.
10. Каганов И. и Котылев М., Преобразование постоянного тока в однофазный нонными приборами, „Электричество“, 1936, № 7.
11. Круг К., Новые пути преобразования электрической энергии, „Электричество“, 1933, № 15, стр. 5—10.
12. Синельников Е. и Данилевский А., К вопросу о преобразовании постоянного тока в переменный, ОНТИ, 1935.
13. Тихменев Б., Новые схемы вентильного двигателя, „Электричество“, 1935, № 12, стр. 39—40.
14. Alexanderson E. and Mittag A., Thyatron Motors, Electr. Eng., Nov, 1934, v. 33, p. 1517—23.
15. Brunner G., Die Verwendung des Gleichstromwechselstrom-Mutators für die Nutzbremmung in Bahnanlagen, Brown-Boveri, 1934, № 12, S. 224—25.
16. Deutschmann P., Stromrichter für Umkehrantriebe, Siemens Zeit. Sonderheft, 1933, S., 295.
17. Ehrensperger, Umrichter mit Strom- und Spannungsglättter zur elastischen Kupplung eines Dreiphasen Netzes 60 Perioden, mit einem Einphasen Netz, 16 $\frac{2}{3}$ Periodes, BBC Mitt., 1934, № 6, S. 95—112 25 Abs.
18. Ehrensperger, Ртутный выпрямитель, управляемый серками, и его применение в качестве инвертора, Revue Générale de l'Electricité, т. XXXII, № 14, 1932.
19. Ehrensperger, Преобразователи со сглаживающим дросселем и конденсатором для преобразования тока 50 пер. в ток 16 $\frac{2}{3}$ пер.
20. Feinberg R., Zur Theorie der Drehstrom-einphasenstrom-Umformung mit Hüllkuten-Umrichtern, E. u. M., 1933, № 51, S. 671.
21. Feinberg R., Theory of the 3-phase to 1-Phase Mercury-Arc Frequency Converter, Archiv für Elektrot., 1933, 27 Aug, 1 p. 539—57.

22. Feinberg R., Das Verhältnis von Primär zu Secundär Blindleistung bei Hüllkurven Umrichter, E. u. M., Aug. 1433, H. 34, S. 457.
23. Förster F., Der Wechselrichter zur Umwandlung von Gleichstrom in Wechsel- oder Drehstrom, Elektrizität im Bergbau, 1935, № 1, S. 11—12.
24. French W., High Voltage D-C-transmission, Elec. Rev., 1936, v. 116, № 3033, p. 47—8.
25. Göschel H., Arc Rectifier for D. C. Transmission, VDI, March 18, 1933, v. 77, p. 291—93.
26. Hafner, Das gittergesteuerte Quecksilberdampf-Ventil als Gleichrichter und Gleichstrom-Wechselstrom-Umformer (Inverter), Bul. Oerlikon, Bd. 725, № 134—138.
27. Hellmund R., Grid Controlled Rectifiers and Inverters, El. Eng., 1934, № 10, p. 1400—401.
28. Hemsley S., Transformer Rectifier, Elec. Rev. March 1, 1935, v. 116, p. 202.
29. Issendorff J., Der gesteuerte Umrichter Wissenschaftliche Veröffentlichungen a. d. Siemens Werken, 1935, № 3, S. 1—13.
30. Partsch A., Vorführung von Stromrichtern in des AEG Fabriken. AEG Mitt. 1932, № 11, s. 346.
31. Kellier H., Das Belastungsdiagramm des Gleichstrom-Wechselstrom-Mutators, BBC. Mitt., 1934, № 12, S. 229—33.
32. Kern E., Coupling of 3-Phase Networks by a Single Mercury-Arc Converter, BBC. Mitt., Dec. 1934, v. 21, p. 214—18.
33. Керн Е., Бесколлекторный однофазный электровозный двигатель от 40 до 60 пер/сек, El. Bahn., Nov., 1931, H. 11.
34. Ketner K. and Reinhardt G., Connections and Control of Direct Inverters. ETZ, 1935, Bd. 56, S. 829—32 u. 861—3.
35. Kluge J., Frequency Conversion with Rectifier and Capacity Load., Phys. Zeitsch., April 1934, Bd. 35, S. 275—78.
36. Stöhr, Über Rückwirkungen der Stromrichter auf das speisende Wechselstromnetz, AEG Mitt., Oct. 1934, S. 319, Nov. S. 348.
37. Laub H., Umrichter, Arch. f. El., 1933, Bd. 27, S. 215.
38. Meyer-Delius, Heidelberg, Die Strom- und Spannungsverhältnisse in Anlagen zur Umrichtung von Drehstrom mit 50 Hz in Einphasenstrom mit $16\frac{2}{3}$ Hz, El. Bahn., 1932, Bd. 8, S. 59.
39. Meyer-Delius, Betrieb von Motoren mit Hilfe gittergesteuerter Quecksilberdampf-Gleichrichter, VDE-Fachberichte, 1931, S. 26—29.
40. Reinhardt G., Untersuchungen am Umrichter mit Gleichstrom-Zwischenkreis, El. u. Maschinenbau, H. 23, Juni 1934, H. 24, Juni 1934.
41. Schenkel, Die Technische Grundlage der Verwendung der gittergesteuerten Gleichrichter. ETZ Bd. 53 (1932), s. 767.
42. Stöhr, Max Technische Grundlagen der elastischen Kupplung von Wechselstromnetzen mittels gesteuerter Entladungsgefäße, Arch. für El., Bd. 26, 1932.
43. Stöhr, Über Rückwirkungen der Stromrichter auf das speisende Wechselstromnetz, AEG-Mitt., Oct. 1934.
44. Sabbah C. A., Series-parallel Type Static Converters, Csen. El. Rev, May 1931, v. 34, № 5, № 10 Oct., № 12 Dec.
45. Träger R., Technische Grundlagen und Anwendungen der Stromrichter, El. Bahn. 551, März 1932.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоэлектронная эмиссия 126
 Алюминиевый выпрямитель 33
 Анод газотрона 88
 " зажигания 131
 " ртутного выпрямителя 151
 Анодное падение напряжения в газотронах 73
 Аноды электронных выпрямителей 49
 Атом, возбуждение 57
 " ионизация 57
 " метастабильный 59
 Бабат Г. И. 91, 227
 Биптроны 81
 Бойль 53
 Вакуум выпрямителя 172
 " измерение 183
 Вакуумметр Мак-Леода 183
 " электрический 185
 Вакуумная система выпрямителя 172
 Вакуумный выпрямитель 34
 " корпус металлического выпрямителя 150
 Вентиль 7
 Вентильная прочность 10
 Вентильный двигатель 6, 263
 Вероятность возбуждения и ионизации 59
 Вибрационный выпрямитель 26
 Влияние стенок газотрона 65
 Внешняя характеристика выпрямителя 196
 " инвертора 248
 Внутреннее падение напряжения в выпрямителе 9
 Водяная рубашка ртутного выпрямителя 157
 Возбуждение атома 57
 Возбуждение ртутного выпрямителя 154
 Вологдин В. П. 5
 Вольтамперная характеристика самостоятельного разряда 123
 Вольтамперные характеристики газотрона 74
 Вольфрамовый катод 48
 Время зажигания дуги 77
 Выпрямители, классификация 9
 " механические 8
 " общие требования 9
 " с тлеющим разрядом 9
 " твердые 6, 28
 " электронные 34
 Выпрямитель алюминиевый 33
 " железный 34
 " жидкий 32
 " купроксный 28
 " меднооксидный 28
 " характеристика 29
 " металлический ртутный 146
 " " ртутный формовка 191
 " механический контактный 26
 " " с ртутной струей 27
 " предельный вакуум 182
 " ртутный 5
 " с вращающимся коммутатором 25
 " с дугой в атмосфере 236
 " срок службы 11
 " электрический 8
 " электролитический 32
 " электронный, характеристика 46
 Выпрямление двухфазного тока 14
 " однофазного тока 11
 " трехфазного тока 18
 Газельтине 261
 Газовые выпрямители, защита сетками от перегрузок и обратных зажигания 118
 Газотрон 6, 52
 " анод 88
 " влияние стенок 65
 " вольтамперные характеристики 74
 " завода "Светлана", параметры 81
 " " " срок службы 85

Газотрон катод 86
 " катодная горловина 54
 " катодное падение напряжения 73
 " колбы 89
 " конструкция 86
 " неоновый, основы расчета 54
 " обратное зажигание 79
 " падение напряжения 72
 " плотность газа в баллоне 53
 " схемы включения 91
 " температурный режим 76
 " тепловые экраны катода 87
 " типы 81
 " явления у анода 71
 " " " катода 69

Гартмана выпрямитель 27
 Геде, насос 173
 " уравнения 179
 Гейгера схема 115
 Гей-Люссак 53
 Геттер 90
 Гретца схема 16
 " " при трехфазном токе 36

Движение зарядов в плазме 62
 Двухластинчатый коммутаторный выпрямитель 25
 Духнолупериодное выпрямление 14
 Денонизация в межэлектродном пространстве тиратрона 99
 " постоянная времени 100

Деленбах 198
 Дешман 41
 Диаграмма напряжений при сеточном регулировании ртутного выпрямителя 135
 Дуга в ртутном выпрямителе 126
 Дуговой разряд 123

Железный выпрямитель 34
 Жидкий выпрямитель 32

Зажигание дуги в ртутном выпрямителе 131
 " ртутного выпрямителя 154
 Закон распределения Максвелла 38
 Заряды, движение в плазме 62
 Защита сетками от перегрузок и обратных зажигания газозовых выпрямителей 118
 Зоммерфельд 40

Игнитрон 6, 230
 Измерение вакуума 183
 Инвертирование тока 240
 Инвертор 6
 " внешние характеристики 248
 " коммутация тока 244
 Ионас 262

Ионизация атома 57
 " газа электронным ударом 57
 " ступенями 59
 " толчком 57
 Ионные преобразователи 6
 " приборы с магнитным управлением 7
 Искренне механических выпрямителей 25
 Искровой высоковольтный выпрямитель 26
 Ипускание электронов накаливаемым катодом 40

Катод газотрона 86
 " оксидный 48, 86
 " подогревный 86
 " ртутного выпрямителя 153
 " с косвенным подогревом 49
 " " непосредственным подогревом 49
 " электронного выпрямителя 48
 Катодная горловина газотрона 54
 Катодное падение напряжения в газотронах 73
 " пятно 127

Катушка Кюблера 193
 Керп 263
 Классификация выпрямителей 9
 Кнудсен 180
 Кобель 128
 Колбы газотронов 89
 Коммутации угол 196
 Коммутация тока в инверторе 244
 Комитон 127
 Конструкция газотронов 86
 " электронных выпрямителей 48
 Коэффициент мощности инверторной установки 250
 " усиления 94

Крапинин В. К. 6
 Красильов А. В. 91
 Кривая тока эмиссии вольфрамового катода 42
 Кривые типовой мощности ртутного выпрямителя 142
 Кристаллическая решетка 40
 Критическая разность потенциалов 70
 Купер-Юйт 5
 Купроксный выпрямитель 28
 Кюблер 193

Лангмюр 61, 126
 Лангмюра и Чапльда уравнение 44
 Лебль 261
 Лямар 127
 Латура схема 51
 Людвиг 231

Расчет анодной манжеты металлического ртутного выпрямителя 159
 „ катода ртутного выпрямителя 165
 „ колбы стеклянного ртутного выпрямителя 170
 Регулирование выпрямленного тока и напряжения тиратрона 98
 „ преобразовываемой мощности инвертора 251
 Рекомбинация 59
 Рекуперация энергии 255
 Реле термотиратронные 116
 „ фототиратронные 117
 Решетка кристаллическая 40
 Ричардсон 41
 Ричардсона и Денмана формула 41
 Ртутнострельный выпрямитель Гартмана 27
 Ртутный выпрямитель 5, 118
 „ „ водяная рубашка 157
 „ „ возбуждение 154
 „ „ зажигание 154
 „ „ иностранных фирм 158
 „ „ катод 153
 „ „ кривые типовой мощности 142
 „ „ обратное зажигание 138
 „ „ обратный ток 137
 „ „ питание 192
 „ „ потенциал корпуса 130
 „ „ принцип действия 121
 „ „ пусковые характеристики 136
 „ „ рабочие аноды 151
 „ „ расчет анода 166
 „ „ расчет анодной манжеты 159
 „ „ расчет катода 165
 „ „ соотношение токов и напряжений в управлении сетками 224
 „ „ стеклянный 144
 „ „ столб дуги 128
 „ „ с управляющей сеткой 134
 „ „ схемы питания 192
 „ „ уплотнения 146
 „ „ явления у анода 130
 „ „ катода 127
 „ газотрон, основы расчета 56
 „ насос 175
 Самостоятельный разряд в газах 122
 Свободный пробег молекулы 36
 „ „ электрона 36
 Сетка в ионном приборе 94
 „ „ электронном приборе 92
 Сеточные токи 103

Скорость электронов в электрическом поле 37
 Слепая 231
 Соотношение токов и напряжений в простейших схемах выпрямления 21
 „ токов и напряжений в управляемом сетками ртутном выпрямителе 224
 Срок службы выпрямителя 11
 „ „ газотронов завода „Светлана“ 85
 „ „ тиратронов завода „Светлана“ 111
 Стеклянный ртутный выпрямитель 119, 144
 „ „ расчет колбы 170
 Стеклянные выпрямители завода „Светлана“ 143
 Столб дуги ртутного выпрямителя 128
 Схема включения электронных выпрямителей 51
 „ возбуждения и зажигания ртутного выпрямителя 132
 „ Гейгера 115
 „ Гретца 16
 „ „ при трехфазном токе 20
 „ Латура 51
 „ питания ртутных выпрямителей 192
 „ сеточного регулирования с острой кривой сеточного напряжения 114
 „ сеточного регулирования с фазорегулятором 113
 „ сеточного управления с контактной шайбой 112, 136
 „ управления с острой кривой напряжения 136
 Схемы включения газотронов 91
 „ питания маломощных стеклянных выпрямителей 193
 Танталовый выпрямитель 33
 Таунсендовский разряд 124
 Твердый выпрямитель 6, 28
 Темный разряд 124
 Температурный режим газотрона 76
 Тепловой расчет анода ртутного выпрямителя 166
 Тепловые экраны катода газотрона 87
 Термотиратронные реле 116
 Типовая мощность трансформатора 13
 Типы газотронов 81
 „ тиратронов 110
 Тиратрон 6, 91
 „ завода „Светлана“, параметры 111

Тиратрон завода „Светлана“, срок службы 111
 „ как управляемый выпрямитель 115
 „ пусковые характеристики 105
 „ типы 110
 „ характеристики зажигания 106

Тлеющий разряд 123, 124

Ток прерывистый 7

Торированный катод 48

Трансформация постоянного тока 262

Трехфазная схема с выводом нулевой точки у трансформатора 18

Трубки газового разряда 37

Тунгары 81

Уайт Д. 230, 232

Угол коммутации 196

„ перекрытия 196

Ульман 227

Универсальный преобразователь тока 134

Уплотнение ртутного выпрямителя 146

Уравнения Геде 179

„ Лангмюра и Чайльда 44

Фаунд 69

Фильтр для сглаживания пульсации 24

Форвакуум 172

Формовка металлического выпрямителя 191

Формула Ричардсона и Дешмана 41

Фототиратронные реле 117

Фотоэффект 57

Характеристики зажигания тиратрона 106

„ меднооксидного выпрямителя 29

„ трехэлектродной лампы 93

„ электронного выпрямителя 46

Хэли 52, 71, 91, 160

Шоттке 29

Электрический вакуумметр 185

„ выпрямитель 8

Электролитический выпрямитель 32

Электронная лампа 5

Электронные выпрямители 34

„ „ завода „Светлана“ 50

„ „ катод 48

„ „ конструкция 48

„ „ схемы включения 51

Электрон, свободный пробег 36

„ скорость в электрическом поле 37

Электросварка с игнантиронами 236

Эмиссия автоэлектронная 126

Эреншпергер 260

Явления у анода газотрона 71

„ „ „ ртутного выпрямителя 130

„ „ катода газотрона 69

„ „ „ ртутного выпрямителя 127

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Введение	
Глава II. Выпрямление тока	
1. Принципы выпрямления тока и типы выпрямителей	7
2. Общие требования к выпрямителям	9
3. Выпрямление однофазного тока	11
4. Выпрямление трехфазного тока	18
5. Пульсации тока и напряжения	22
Глава III. Механические выпрямители	
6. Выпрямитель с вращающимся коммутатором	25
7. Вибрационный выпрямитель	26
8. Механический выпрямитель с ртутной струей	27
Глава IV. Твердые и жидкие выпрямители	
9. Твердый выпрямитель	28
10. Жидкий или электролитический выпрямитель	32
Глава V. Вакуумные или электронные выпрямители	
11. Устройство и принцип действия	34
12. Свободный пробег молекул и электронов	35
13. Скорость электронов в электрическом поле	37
14. Тепловые скорости молекул и электронов. Закон распределения Максвелла	38
15. Испускание электронов накалимым катодом	40
16. Связь между током и напряжением в электронном выпрямителе (уравнение Лангмюра-Чайльда)	43
17. Распределение потенциала в межэлектродном пространстве	45
18. Характеристики электронного выпрямителя	46
19. Конструкция и типы электронных выпрямителей	48
20. Схемы включения электронных выпрямителей	51
Глава VI. Газотроны	
21. Устройство и принцип действия	52
22. Плотность газа или пара в баллоне газотрона	53
23. Ионизация газа электронным ударом	57
24. Явления в межэлектродном пространстве	60
а) Столб дуги	61
б) Влияние стенок	65

	Стр.
с) Явления у катода	69
д) Явления у анода	71
25. Падение напряжения в газотроне	72
26. Вольтамперная характеристика газотрона	73
27. Температурный режим газотрона	76
28. Время зажигания дуги	77
29. Нарушение вентиляционного действия	78
30. Типы и параметры газотронов	81
31. Конструкция газотронов	86
32. Схемы включения газотронов	91

Глава VII. Тиратроны

33. Устройство и принцип действия	91
34. Сетка в электронном приборе	92
35. Сетка в ионном приборе	94
36. Регулирование выпрямленного тока и напряжения	98
37. Деионизация в межэлектродном пространстве	99
38. Сеточные токи	103
39. Характеристики сеток	105
40. Потеря управляемости сеткой	107
41. Типы тиратронов	110
42. Схемы сеточного управления	112
43. Схемы применения тиратронов	115
44. Защита сетками от перегрузок и обратных зажигания	118

Глава VIII. Ртутный выпрямитель

45. Устройство ртутного выпрямителя	118
46. Принцип действия ртутного выпрямителя	121
47. Самостоятельный разряд в газах	122
48. Дуга в ртутном выпрямителе	126
49. Падение напряжения в дуге выпрямителя	130
50. Зажигание и поддержание дуги в выпрямителе	131
51. Переход дуги с анода на анод	133
52. Ртутный выпрямитель с управляющей сеткой	134
53. Обратный ток. Обратное зажигание	137
54. Причины обратных зажигания и их устранение	139
55. Типы ртутных выпрямителей. Кривые типовой мощности	142

Глава IX. Конструкция ртутных выпрямителей

56. Стекланный ртутный выпрямитель	144
57. Металлический ртутный выпрямитель	146
а) Уплотнения	146
б) Вакуумный корпус	150
с) Рабочие аноды	151
д) Катод	153
е) Система зажигания и возбуждения	154
ф) Водяная рубашка выпрямителя	157
58. Выпрямители иностранных фирм	158

Глава X. Элементы расчета ртутного выпрямителя

59. Расчет анодной манжеты металлического ртутного выпрямителя	159
60. Расчет корпуса выпрямителя	162
61. Расчет катода	165
62. Тепловой расчет анода	166
63. Расчет колбы стекланный ртутного выпрямителя	170

Глава XI. Вакуумная система и система охлаждения металлических ртутных выпрямителей

Стр.

64. Вакуумная система выпрямителя	172
65. Масляный насос	173
66. Ртутный насос	175
67. Производительность насоса	177
68. Влияние соединительных труб	180
69. Натекание в корпус выпрямителя	181
70. Предельный вакуум в выпрямителе	182
71. Измерение вакуума. Вакуумметр Мак-Леода	183
72. Электрический вакуумметр	185
73. Проверка натекания в выпрямитель	186
74. Система охлаждения металлического выпрямителя	188
75. Количество охлаждающей воды	190
76. Формовка металлического выпрямителя	191

Глава XII. Схемы питания ртутных выпрямителей

77. Применяемые схемы	192
78. Схемы звезда-звезда и треугольник-звезда	193
79. Влияние индуктивности трансформатора. Выходная характеристика выпрямителя	196
80. Схема звезда-шестифазная звезда	203
81. Схема треугольник-шестифазная звезда	207
82. Схема звезда-двойной зигзаг	210
83. Схема звезда-двойная звезда с однофазным дросселем	214
84. Соотношения токов и напряжений в управляемых сетках ртутном выпрямителе	224
85. Пульсации в кривых тока и напряжения в управляемых сетках выпрямителей	229

Глава XIII. Новые типы выпрямителей

86. Игняйatron	230
87. Выпрямитель с дугой в атмосфере	236

Глава XIV. Инвертирование и двухстороннее преобразование тока

88. Переход от выпрямления к инвертированию тока	240
89. Коммутация тока в инверторе	244
90. Внешние характеристики инвертора	249
91. Коэффициент мощности инверторной установки	250
92. Регулирование преобразовываемой мощности	251
93. Характеристики предельных нагрузок инвертора	252
94. Работа инвертора на режиме рекуперации энергии	254
95. Преобразование одного вида переменного тока в другой	257
96. Трансформация постоянного тока	262
97. Ионный прибор в роли коллектора двигателя	263
Библиография	264
Алфавитный указатель	271



Сдано в производство 29/XI-1936.

Подписано к печати 21/II-1937.

Формат бумаги 62 × 94^{1/16}

Количество печ. лист. 17,4

Количество бум. лист. 8,7

Учетно-авторских лист. 24,32

Колич. тип. знаков в 1 бум. листе 101376

Авторских листов 23,52

Энергоредакция № 94

Заказ № 4065

Тираж 6 000. Учетный № 7213

Уполном. Главлита № Б-5365

2-я типография ОНДН им. Ветерина Солововой, Ленинград, пр. Красн. Командиров, 29.

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
14	3 сверху	выпрямленные	выпрямительные	Ред.
45	2 „	β	β ²	Автора
205	7 снизу	вверх	вниз	„
257	16 „	7	172	Типогр.
Нумерация страниц 273—278 ошибочно увеличена на 100				„

к. 4065—Электронные и ионные преобразователи