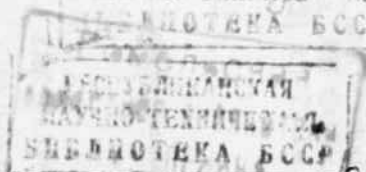


Доктор технических наук, проф. А. М. БАМДАС

621.314.6

Б22

ТРАНСФОРМАТОРНО- ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА

1945

ЛЕНИНГРАД

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий обзор, составленный для широких кругов инженеров-электриков, будет также полезен и инженерам, занимающимся на заводах проектированием трансформаторно-выпрямительных агрегатов. Наряду с этим он может служить кратким пособием по специальному курсу высоковольтной малоомощной аппаратуры, читаемому автором для студентов Московского Ордена Ленина энергетического института им. Молотова.

Материалом для составления книги послужили в основном работы, напечатанные в различных электротехнических журналах в течение последнего десятилетия, и доклад, составленный автором в 1943 г. по поручению Технического совета Народного комиссариата электропромышленности.

Редактор-дизайнер *В. М. Сосновский*

Технический редактор *О. Залышкина*

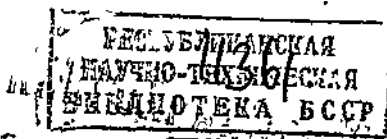
Сдано в пр-во 21/X 1944 г. Подписано к печати 25/V 1945 г. Объем 2 $\frac{3}{4}$ л. 4,15 уч.-авт. л. Тираж 1000 экз. Формат бумаги 34×108/32

60192 тип. знак, в 1 печ. л.

Заказ 1326

А 16788

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., д. 10.



Глава I

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ И ЕЁ ЗНАЧЕНИЕ

Электрическую очистку промышленных газов применяют для получения газов, имеющих состав, пригодный к дальнейшему использованию для улавливания частиц ценных материалов и предотвращения загрязнения окружающей территории при выпуске газа в атмосферу.

Электрическая очистка газа производится в особых аппаратах — электрофильтрах, являющихся крупными техническими сооружениями; например, электрофильтр для очистки 30 000 м³/час доменного газа имеет вид башни высотой около 35 м.

Укажем основные области применения электрофильтров и кратко осветим вопрос о значении очистки газов промышленных установок¹.

Очень велико экономическое значение очистки колошниковых газов доменных печей. Непосредственное использование высококалорийного доменного газа, например, в кауперах, затруднительно вследствие его запыленности. Между тем использование газов одной только доменной печи объемом 300 т чугуна в сутки равносильно суточной экономии 450 т угля.

Абсолютно необходима очистка газа в сернокислотной промышленности [1]. Газ из печей должен быть очищен от огарка (камерный и башенный способы) и от мышьяка (контактный способ). Без очистки газа невозможно производство серной кислоты и др.

В качестве примеров использования электрофильтров для улавливания ценных частиц можно указать на фильтры для осаждения туманов серной, фосфорной и азотной кислот. Весьма существенно улавливание частиц в цементной промышленности [2] и апатитовой.

Важнейшее экономическое значение имеет улавливание электрофильтрами частиц в цветной металлургии: меди, олова, свинца, сурьмы, окиси цинка, окиси никеля и др. [3]. На одном из заводов НКЦМ ежегодно улавливается из печных газов 3—3,5 т никелевой пыли.

Вся продукция некоторых серных заводов и сажевых фабрик получается в электрофильтрах.

Из гигиенических соображений электрофильтры применяют для очистки от золы дымовых газов котельных электростанций и заводов. При отсутствии газоочистки тепловые электростанции сильно загрязняют город; при высоте трубы 100 м зола загрязняет местность вокруг котельной в радиусе до 16 км. Действительно, при расходе 1 000 т пылевидного угля в сутки в атмосферу выбрасывается около 70—90 т золы и до 15 т серы.

¹ Более подробные данные приводятся в специальных работах, из которых в тексте даны ссылки — порядковые номера библиографии, помещенной в конце настоящей монографии.

Дел.



40935³

Из сказанного ясно, что очистка газов применяется в самых разнообразных отраслях промышленности и имеет большое народнохозяйственное значение.

Электрическая очистка промышленных газов имеет следующие преимущества по сравнению с другими методами газоочистки: 1) более высокая степень очистки; 2) относительно малый расход электроэнергии — около 0,15 квтч на 1000 м³ газа; 3) возможность очищать газы, содержащие кислоты; 4) меньшие габариты аппаратуры (4).

Электрофильтры применяют в СССР с 1926 г. Однако значительное распространение они нашли в последние десятилетия. В 1930 г. в СССР очищалось всего 16 200 м³/час газа, а в 1938 г. уже около 15 млн. м³/час. В 1938 г. число агрегатов достигло примерно 800 [5].

За границей электрофильтры распространены весьма широко. Так, например, фирмой Сименс-Лурги в одной лишь химической промышленности установлено к концу 1931 г. около 800 фильтров. За последние предвоенные годы в Германии установлено 286 крупных электрофильтров для дымовых газов. Они очищают около 46 млн. м³/час газа из топок, работающих на буром или каменном угле [6].

Очень широко применяют электрофильтры в США; в цементной промышленности, например, уже в 1931 г. работало 42 фильтра.

В качественном отношении отдельные конструкции советских фильтров превосходили иностранные, например, мокрые одноступенчатые фильтры для очистки колошникового газа доменных печей [7].

В послевоенные годы, несомненно, следует ожидать широчайшего развития в СССР электрической очистки газов.

Основное электрическое оборудование для фильтров — трансформаторно-выпрямительные агрегаты — до 1939 г. изготовлял Московский рентгеновский завод НКЭП.

Следует признать совершенно необходимым возобновление производства агрегатов нашей электропромышленностью. Целесообразно организовать специальный завод или крупный отдельный цех на одном из рентгеновских заводов.

В настоящее время в тресте Газоочистка НКХП разрабатываются под руководством автора новые конструкции агрегатов. Исследовательская работа в этой области проводится в НИОГАЗ (Москва).

Глава 2

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

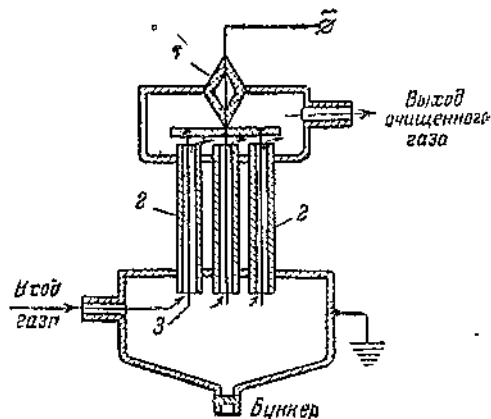
Современные электрофильтры для очистки промышленных газов делятся на два основных типа: 1) грубчатые или цилиндрические и 2) пластинчатые.

Трубчатый электрофильтр (фиг. 1) состоит в основном из набора заземленных труб с натянутыми вдоль их оси тонкими проводами. Последние соединены с одним полюсом электрической цепи высокого напряжения; второй ее полюс заземлен. Очищаемый газ проходит внутри труб.

Пластинчатый фильтр состоит из ряда параллельных заземленных пластин, с помещенными между ними тонкими пропадами. Газ проходит в пространстве между пластинами.

Между проводами и заземленными трубами, или пластинами, образуется электрическое поле. Разность потенциалов в современных фильтрах лежит в пределах 30 000—100 000 в.

Тонкие провода — коронирующие электроды — изготовляют из фехральной или железной проволоки диаметром 2—6 мм. Внутренний диаметр труб обычно 200—300 мм, высота труб 3—6 м, число труб или пластин



Фиг. 1. Трубчатый фильтр.

1 — проходной изолятор; 2 — осадительные электроды; 3 — коронирующие электроды.

в фильтре определяется его производительностью. Общая длина коронирующих электродов также соответственно меняется от 6 800 (фильтр ДВ-1) до 100 м (фильтр М-1). Каждая заземленная пластина в пластинчатом фильтре имеет большие размеры, например, в советских конструкциях $4,5 \times 2,5$ или $3 \times 1,6$ м². Расстояние между пластинами около 250 мм.

Приведем для ориентировки габаритные размеры советских электрофильтров, изготовленных в последние годы трестом Газоочистка для разных отраслей промышленности. Подробные данные о конструкции электрофильтров имеются в каталоге треста Газоочистка «Газоочистительное оборудование» (Стандартгиз, 1943 г.).

Трубчатый фильтр ДВМ-1 для очистки дымовых газов производительностью 400 000 м³/час и степенью очистки 90% имеет габариты: $16,64 \times 6,0$ м² в плане и 16,7 м по высоте (расход металла 90 т, железобетона 130 м³) [8].

Трубчатый электрофильтр ДМ-9 и его скруббер (мокрая очистка доменного газа) устанавливаются в железной башне высотой 35,28 м и диаметром 8,2 м. По размеру он близок к доменной печи.

Каждый фильтр имеет две последовательных ступени — в первой устанавливается 356 труб диаметром 334 мм и высотой 1,5 м, во второй — 452 трубы диаметром 294 мм и высотой 3 м. Скорость газа около 0,8 м/сек, производительность — 80 000 м³/час.

Пластинчатый электрофильтр ХК-45, предназначенный для очистки печного газа, содержащего SO₂ и SO₃, и используемый в цветной металлургии и в химической промышленности, представляет собой вертикальную кирпичную камеру. Габаритные размеры фильтра, состоящего из двух секций, следующие: ширина 4,9 м, длина 5,5 м, высота 11,9 м. Производительность 20 000 м³/час.

Осадительные электроды (заземленные трубы) в некоторых фильтрах промываются водой. Чтобы коронирующие провода не обрастали пылью,

их встряхивают при помощи ударов по раме, к которой они прикреплены. Чистота электродов имеет решающее влияние на работу фильтра.

Принцип действия электрофильтра заключается в использовании коронного разряда при атмосферном давлении. Тонкие провода, помещенные внутри заземленных труб или между заземленными пластинами, коронируют. Под действием электрического поля электрические заряды двигаются от коронирующих электродов к заземленным, осадительным электродам. В фильтре вокруг коронирующих электродов образуется зона ударной ионизации и частицы, взвешенные в газе, заряжаются.

Под действием сил электрического поля заряженные частицы направляются к осадительным электродам, отдают им свой заряд и осаждаются на них. С осадительных электродов они удаляются в специальные бункеры, например, в зольники.

Для улавливания частиц необходимо:

1) наличие в газе униполярного электрического заряда достаточной величины; 2) наличие достаточно сильного электрического поля.

Большое влияние на процесс очистки газа оказывают: скорость газа, его влажность и температура, радиус частиц, величина тока, форма кривой напряжения и др. [9].

Здесь дано предельно краткое описание принципа действия электрофильтра. Явления, происходящие в электрофильтрах, весьма сложны и еще мало изучены.

Исчерпывающий современный материал по физическим процессам в электрофильтрах (оригинальный и компилятивный) приведен в докторской диссертации С. П. Жебровского «Электрофильтры и их сепарационные свойства», МЭИ, 1944 г. [10]; кратко сведения имеются в ряде книг, указанных в библиографии [2], [4], [7].

Глава 3

НЕОБХОДИМАЯ ФОРМА КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Для нормальных промышленных электрофильтров необходим источник электрической энергии высокого напряжения (от 40 до 100 кВ). Электрическая очистка газов, как показали многочисленные исследования, протекает значительно лучше при питании фильтра постоянным током.

Меньшая степень очистки при переменном токе по сравнению с постоянным объясняется тем, что в первом случае значительно меньше результирующая скорость движения заряженных частиц к осадительному электроду и электрическая очистка происходит главным образом вследствие образования из-за периодических перемен направления движения частиц, молниевых, осаждающихся затем под действием собственного веса.

В промышленных фильтрах коронирующие электроды всегда приключаются к отрицательному полюсу источника высокого напряжения, осадительные — к положительному, заземленному полюсу.

Указанный выбор полярности вызван большей подвижностью отрицательных ионов по сравнению с положительными и большей электрической прочностью фильтра при отрицательной короне. Требуемый для фильтра ток одного направления получают путем выпрямления напряжения высоковольтного трансформатора.

Высоковольтные генераторы постоянного тока до сих пор не нашли применения в области электрической очистки газов ввиду их малой надежности и высокой стоимости; отдельные попытки их использования не увенчались успехом.

В зависимости от схемы выпрямителя и числа фаз трансформатора возможно получение совершенно разных форм кривой выпрямленного напряжения. При однофазном трансформаторе можно питать фильтр полуволновым или двухполуволновым напряжением; форма кривой напряжения при многофазном трансформаторе определяется числом его фаз. Для электрофильтров применяются трехфазные трансформаторы, дающие после выпрямления форму кривой, соответствующую обычной схеме Греча. По предложению автора могут применяться также и двухфазные трансформаторы. В последнем случае форма кривой выпрямленного напряжения на фильтре мало отличается от таковой при трехфазном трансформаторе. В дальнейшем трансформаторно-выпрямительные агрегаты, дающие полуволновую форму кривой напряжения, будем называть полуволновыми, дающие двухполуволновую — однофазными; агрегаты с трехфазным трансформатором — трехфазными и, наконец, двухфазные агрегаты системы автора — выпрямителями СВ.

До настоящего времени нет исчерпывающей ясности в том, какая форма кривой выпрямленного напряжения лучше для электрической очистки газов (11). Этот вопрос имеет важнейшее значение, как определяющий систему агрегатов, целесообразную для выпуска советской электропромышленностью.

Осветим несколько вопрос о выборе формы кривой напряжения. Следует выяснить, при какой форме кривой степень очистки газа выше. Степень очистки фильтра может быть определена из формулы, полученной нами (12) из анализа классической формулы Дейча,

$$\lambda = 1 - \frac{g_2}{g_1} = 1 - e^{-\frac{kI}{v}} \quad (1)$$

где g_1 и g_2 — вес частиц в неочищенном и очищенном газе; I — ток, протекающий через фильтр; v — скорость газа и k — постоянный коэффициент.

Как следует из формулы [1] степень очистки газа увеличивается с увеличением тока.

Для наилучшей очистки фильтр должен работать при наибольшем токе, т. е. при напряжении, при котором есть коронирование, но еще нет установившегося пробоя.

Наибольшее значение тока определяется предельно допустимой величиной выпрямленного напряжения и формой его кривой. Возможная амплитуда напряжения зависит от электрической прочности фильтра. Последняя, в особенности для фильтров с непроводящей пылью, может быть разной при применении различных схем выпрямителей. В наших опытах с фильтром для очистки газа с непроводящей пылью [12] электрическая прочность при многофазном выпрямителе равнялась 50 кв, а при однофазном превышала 65 кв. Электрическая прочность лабораторного фильтра при полуволновом выпрямителе была больше, чем при однофазном. Причины различия в том, что пробой в фильтре как случайные, например, из-за раскачивания коронирующих электродов или изменения состава газа, так и происходящие из-за наличия слоя непроводящей пыли на осад-

тельном электроде, тем легче переходят в установившееся короткое замыкание, чем менее волнистую форму имеет кривая напряжения.

Отметим, что при резко пульсирующем напряжении пылевой слой непроводящих частиц периодически разряжается — «отдыхает», в то время как при многофазном агрегате он непрерывно находится под напряжением и пробой более вероятен.

При наших опытах с фильтром для газа с проводящими частицами [12] не было обнаружено разницы в электрической прочности. Ток при питании фильтра выпрямителем СБ увеличивался в 1,5 раза по сравнению с питанием однофазным выпрямителем; наоборот, для фильтра с непроводящей пылью ток был больше при однофазном выпрямителе. Повидимому, применение выпрямителя СБ целесообразнее других для фильтров с проводящей пылью, так как может быть получена лучшая степень очистки или взята большая скорость газа. Однофазные, особенно полуволновые, выпрямители, вероятно, более рациональны для фильтров с непроводящими частицами.

Опытные данные в отношении полуволновых агрегатов очень незначительны. В одной из лабораторных работ доказано, что при полуволновом агрегате электрическая прочность фильтра больше, чем при однофазном, так как слой пыли на осадительном электроде в первом случае находится в более благоприятных условиях. Степень очистки при полуволновом агрегате будет выше, чем при однофазном, если через фильтр сможет протекать больший ток.

Имеются также предположения, что зарядка частиц лучше протекает при резко пульсирующем напряжении, чем при малопульсирующем. Опытных данных нет.

По нашему мнению основная масса советских агрегатов должна выпускаться однофазной системы, которая легко может быть переделана в полуволновую (см. описание выпрямителя МБ). Следует провести дополнительное специальное исследование схемы выпрямления для фильтров с проводящими частицами, в частности, для мокрой очистки доменного газа. Полагаем, что выпрямитель СБ более целесообразен, чем однофазный, и безусловно лучше, чем трехфазный.

Глава 4

НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Агрегаты для электрофильтров должны иметь регулирование вторичного напряжения. Необходимость этого вызвана тем, что при эксплуатации, по технологическим причинам, меняются параметры газа и, следовательно, электрическая прочность фильтра. Отметим также, что при проектировании трудно определить необходимую величину напряжения. Уровень наших знаний и накопленный опыт еще недостаточны. Это вообще невозможно при проектировании фильтра для газов, еще не подвергавшихся электрической очистке.

Отметим, что для ряда установок, уже хорошо изученных и стабильно работающих, допустимо регулирование напряжения в узких пределах, например, от 85 до 100%. Современная тенденция направлена в сторону понижения степени регулирования. Например, новые американские фильтры для воздуха конструируются вообще без регулирования напряжения.

Для промышленных фильтров необходимо напряжение порядка 40—100 кв. По мнению автора вторичное напряжение основной массы трансформаторов должно регулироваться в пределах 60—100%. Целесообразен выпуск двух типов агрегатов с разными вторичными номинальными напряжениями, например, 40—70 кв и 60—100 кв.

В СССР до войны изготовлялся только один тип высоковольтного трансформатора для электрофильтров — ЭТВ-157; номинальное напряжение первичной обмотки 380 в, вторичной 70 кв, номинальный вторичный ток — 200 ма (среднее значение). Эти трансформаторы применяются в СССР для однофазных выпрямителей. Регулирование напряжения трансформаторов ЭТВ-157 осуществляется переключением числа витков добавочного автотрансформатора при помощи коммутатора с 21 ступенью.

Вторичное напряжение трансформатора ЭТВ-157 можно изменять под нагрузкой и без разрыва тока в пределах от 18 до 70 кв. Перепад напряжения в пределах от 18 до 48 кв составляет при переходе с одного контакта коммутатора на другой приблизительно 3,7 кв, а в пределах от 48 кв до 70 кв приблизительно 1,8 кв.

Такие чрезмерные по мнению автора пределы регулирования сильно удорожают агрегат. Число ступеней регулирования вполне можно уменьшить, например, до 10. Отметим, что в ряде установок трансформаторы ЭТВ-157 работают при напряжении, не превышающем 40—50 кв.

Ряд европейских фирм выпускает агрегаты с плавным регулированием напряжения трансформатора. Однако для обычных промышленных фильтров вполне достаточна дешевая система ступенчатого регулирования напряжения; плавное регулирование необходимо по мнению автора в основном лишь для лабораторных установок.

Для наиболее мощных промышленных агрегатов целесообразна плавная бесконтактная система регулирования автотрансформатором Норриса, описываемым ниже.

Наши заводы должны выпускать в первую очередь агрегаты со ступенчатой регулировкой напряжения.

За границей выпускают агрегаты разных мощностей от 5 до 45 квз. В СССР выпускали только один тип — мощностью 18 квз. Следует признать выпуск в СССР только одного типа агрегата совершенно неправильным. В ряде наших установок агрегаты работают с недогрузкой, например, при 120 ма. В других, наоборот, приходится устанавливать одновременно два агрегата. Целесообразно изготовление трех типов агрегатов — для выпрямленного тока 120 ма, 230 ма и 350 ма.

Советские трансформаторно-выпрямительные агрегаты универсальны. Они пригодны для подключения к первичным сетям 220, 380 и 500 в. По мнению автора основная масса агрегатов должна быть рассчитана только на номинальное первичное напряжение 380 в; небольшое число агрегатов должно быть универсальным — для 380 и 500 в. Возможность подключения к сети в 220 в излишня.

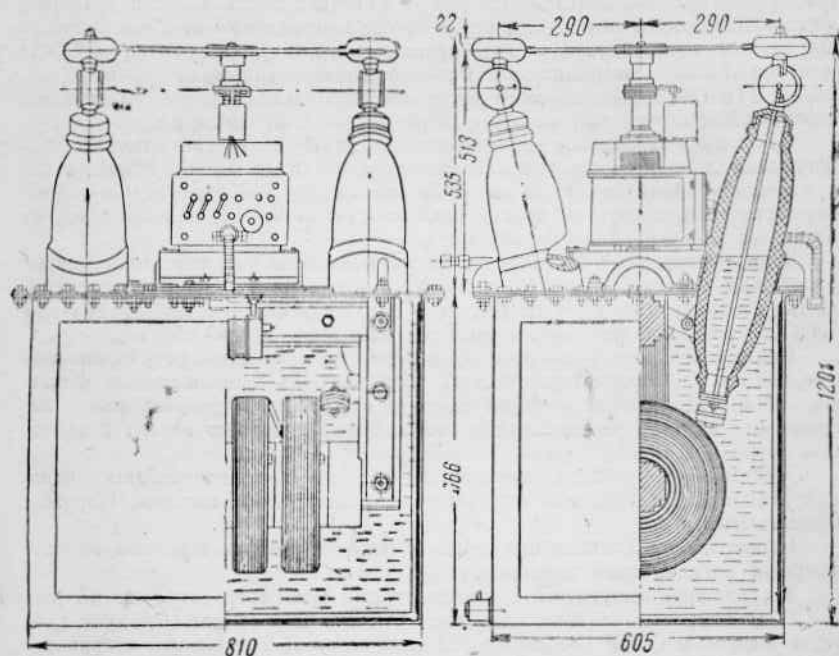
Глава 5

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

1. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Высоковольтный трансформатор является наиболее ответственной частью агрегата для электрофильтра. В однофазных и полуволновых агрегатах применяется однофазный трансформатор; в европейских трех-

фазных агрегатах—трехфазный [32]. Для выпрямителя СБ можно воспользоваться двумя однофазными трансформаторами или одним специальным [37]. Высоковольтные трансформаторы советских агрегатов являются перегулируемыми, т. е. выполняются с неизменным коэффициентом трансформации. Напряжение агрегатов регулируется, как правило, путем применения добавочных автотрансформаторов, включаемых на первичной



Фиг. 2. Однофазный высоковольтный трансформатор ЭТВ-157 с механическим выпрямителем (конструкция Московского рентгеновского завода).

стороне высоковольтного трансформатора. Автор считает целесообразным совершенно исключить добавочный автотрансформатор и применять регулируемый под нагрузкой высоковольтный трансформатор.

Высоковольтные трансформаторы для электрофильтров отличаются от обычных силовых трансформаторов высокого напряжения несравненно меньшим запасом электрической прочности. Достаточно указать, что для трансформаторов на 70 кв выводные изоляторы берутся такими же, как для силовых трансформаторов на 38 кв. Пониженное требование в отношении электрической прочности дает возможность выполнять очень компактные конструкции трансформаторов.

Опишем устройство однофазного советского трансформатора ЭТВ-157 (фиг. 2). Магнитопровод трансформатора—стержневого типа; сечение стержня 86 см².

Стержень ступенчатый; диаметр описанной окружности 104 мм. Номинальное напряжение первичной обмотки 380 в. Обмотка изготовляется из провода ПВД сечением $2,83 \times 6,91$ мм², число витков—192.

Число вольт на виток в этом трансформаторе, как и во всех подобных, близко к двум. На первичную обмотку одет изоляционный цилиндр. Вторичная обмотка, состоящая из четырех отдельных секций (дисков), соединенных последовательно, насажена на изоляционный цилиндр и, следовательно, концентрична по отношению к первичной обмотке. Втулки отдельных секций во избежание осевого перемещения заклинены. Каждая секция имеет по 9 045 витков, намотанных следующим образом: первые внутренние четыре ряда и последние наружные пять рядов имеют по 45 витков в ряду из провода ПВД диаметром 1 мм. Средние 72 ряда намотаны из эмалированного провода диаметром 0,41 мм; между рядами продолжена изоляционная бумага. Магнитопровод с обмотками установлен в баке, заполненном трансформаторным маслом; вес масла 250 кг.

Интересно отметить совершенно необычное для силовых трансформаторов расположение обмоток только на одном стержне магнитопровода и горизонтальное расположение в баке оси его сердечников. Магнитопровод крепится к крышке бака. Размещение обмоток только на одном стержне вполне рационально для данного малогабаритного трансформатора. Следует указать, что более целесообразной была бы броневая конструкция магнитопровода, так как при этом получается экономия в расходе трансформаторной стали для ядра.

При разработке новой конструкции советского трансформатора следует несколько усилить крепление слоев высоковольтной обмотки.

Бак трансформатора ЭТВ-157 и конструкция крепежных деталей не имеют никаких специфических особенностей. Характерным является лишь отсутствие специального консерватора для масла. Вместо обычного консерватора весьма остроумно использован опорный изолятор для выпрямителя, монтируемого на крышке бака трансформатора.

Однофазные трансформаторы иностранных фирм мало отличаются по своей конструкции от описанной.

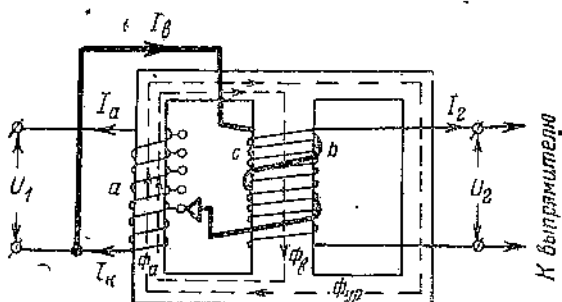
В установках для электрофильтров регулирование напряжения практически возможно только на первичной низковольтной стороне. Для не универсальных агрегатов целесообразно применение трансформаторов с переключением числа витков первичной обмотки, а для универсальных — специальных трансформаторов с добавочной обмоткой (фиг. 3).

На фиг. 4б приведена схема трансформатора с переключением числа витков первичной обмотки. Расход активных материалов для такого трансформатора с регулированием вторичного напряжения в пределах от 50 до 100% значительно меньше, чем в установке с регулируемым трансформатором и с добавочным автотрансформатором. Сравнительные расчеты показали, что экономия меди достигает примерно 25%, а стали — около 40% (нет расхода стали для изготовления автотрансформатора).

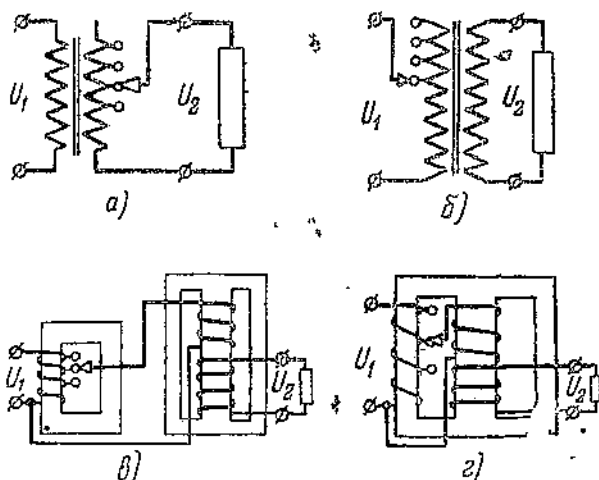
Кроме того приводимые ниже сравнительные расчеты показывают, что потери энергии в регулируемом трансформаторе значительно меньше суммарных потерь в трансформаторе и автотрансформаторе. Уменьшение потерь особенно существенно для агрегатов, работающих круглые сутки. Наконец, при тех же сечениях проводов обмоток регулируемый трансформатор при работе на низких ступенях напряжения допускает по условиям теплового режима несколько большую нагрузку, чем трансформатор нерегулируемый.

Трансформатор с переключением числа витков первичной обмотки конструктивно несколько сложнее для универсальных агрегатов, рассчитанных на питание от сетей с разным номинальным напряжением, на-

пример, 380 и 500 в. Поэтому для универсальных агрегатов полагаем более целесообразным применение трансформаторов с добавочными автотрансформаторными обмотками [18]. Подобные трансформаторы применя-



Фиг. 3. Регулируемый высоковольтный трансформатор с добавочной автотрансформаторной обмоткой
 $w_a = 2 w_b$; $k = 0,2$; $\Phi_b = 0,4 \Phi_a$; $\Phi_{ур} = 0,6 \Phi_a$.



Фиг. 4. Принципиальные схемы регулируемых трансформаторных устройств.

а — трансформатор с переключением числа витков вторичной обмотки; б — трансформатор с переключением числа витков первичной обмотки; в — трансформатор с добавочным ступенчатым автотрансформатором; г — регулируемый трансформатор с добавочной обмоткой.

ются, например, на швейцарских электровазах. Насколько известно автору, для электрических аппаратов трансформаторы с добавочной обмоткой еще не применялись. В СССР эти трансформаторы не выпускались; пробная модель испытана нами в лаборатории.

2. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ РЕГУЛИРУЕМЫЙ ТРАНСФОРМАТОР С ДОБАВОЧНОЙ ОБМОТКОЙ

Однофазный трансформатор с добавочной обмоткой (фиг. 3) устроен следующим образом: на среднем стержне нормального броневых магнитопровода расположена обмотка b с числом витков w_b , и вторичная обмотка c с числом витков w_c . На крайнем стержне помещена автотрансформаторная обмотка a с полным числом витков $w_a = 2w_b$. Второй крайний стержень без обмоток и является уравнительным. Обмотка a приключена к питающей сети с напряжением U_1 . Обмотка b приключена к той же сети и в зависимости от степени регулирования — к той или иной из отпайек обмотки a . Обмотки b и c имеют чисто трансформаторную связь.

Из приведенной на фиг. 3 схемы соединений обмоток видно, что в данном случае, в сущности, применяется обычное регулирование помощью питающего автотрансформатора, но с тем лишь отличием, что его обмотка помещена не на отдельном магнитопроводе, а на крайнем сердечнике самого трансформатора.

Вторичное напряжение трансформатора определяется величиной напряжения на обмотке b :

$$U_2 = U_b \frac{w_2}{w_1}. \quad (2)$$

Величина напряжения U_b зависит от того, от какой отпайки автотрансформаторной обмотки a питается обмотка b . Обозначим через k отношение числа витков во вторичной возбуждающей части автотрансформаторной обмотки ко всему числу ее витков:

$$k = \frac{w_k}{w_a}. \quad (3)$$

Очевидно, что

$$U_b = k U_1. \quad (4)$$

Напряжение U_b может изменяться также до значения, равного величине напряжения сети; соответственно формуле (2) вторичное напряжение изменяется также до максимума. Обмотку a пронизывает магнитный поток Φ_a , определяемый известным выражением

$$\Phi_a = \frac{U_1}{4,44 f w_a}. \quad (5)$$

Этот поток не меняется в зависимости от степени регулирования. Средний стержень пронизывается потоком

$$\Phi_b = \frac{k U_1}{4,44 f w_b} = 2k \Phi_a. \quad (6)$$

Через уравнительный стержень протекает разность потоков

$$\Phi_{yp} = \Phi_a (1 - 2k). \quad (7)$$

При $k = 0,5$, т. е. при $U_b = 0,5 U_1$, через уравнительный стержень поток не протекает; потоки в среднем и крайнем стержнях равны.

При $k = 1$ магнитный поток в среднем сердечнике в два раза больше, чем в каждом из крайних. Легко видеть, что в левом стержне поток

неизменен, в среднем меняется приближенно от нуля до $2\Phi_a$, а в правом от Φ_a до нуля и затем снова до Φ_a . На фиг. 3 указаны величины потоков при $k=0,2$. Соответственно формулам (5), (6) и (7) определяется индукция в сердечниках; при $k=1$ она во всех сердечниках одинакова и равна $\frac{\Phi_a}{S_a}$, где S_a — сечение одного из крайних стержней.

Формулы для расчета токов легко получить, если учесть, что обмотки b и c имеют трансформаторную связь и обмотка a аналогична обмотке понижающего автотрансформатора.

Приведем расчетные формулы для токов в зависимости от величины тока нагрузки I_2 и ступени регулирования, т. е. величины k ; током холостого хода пренебрегаем.

$$I_b = I_2 \frac{w_2}{w_1}, \quad (8)$$

$$I_a = I_2 k \frac{w_2}{w_1}, \quad (9)$$

$$I_k = I_2 (1 - k) \frac{w_2}{w_1}. \quad (10)$$

Трансформатор можно конструировать следующим образом: рассчитать обычным путем, например, задавшись величиной индукции B и нормальным числом вольт на виток e_0 , средний сердечник и обмотки b и c . Сечение каждого из крайних стержней должно быть равно половине сечения среднего стержня. Число витков обмотки a равно $2w_1$ и ее конструирование сводится к выбору сечений и распределению витков. Сечения обмоток рассчитывают как для обычных трансформаторов или автотрансформаторов, например, по заданной плотности тока; из производственных соображений удобно делать ступени обмотки a одного или двух разных сечений. Рассчитав средний и крайний стержни, определяют из конструктивных соображений размеры окон и ярма трансформатора.

Вес меди трансформатора с добавочной обмоткой такой же, как у нерегулируемого трансформатора с добавочным автотрансформатором. Существенная экономия получается в трансформаторной стали. Размеры окон магнитопроводов почти совпадают в обоих типах, и экономия в расходе стали получается близкой к потребности в ней для регулируемого автотрансформатора. По весу расход стали в последнем равен приблизительно $\frac{1}{3}$ расхода стали для высоковольтного трансформатора.

Наличие автотрансформаторной обмотки a позволяет приключать трансформаторы, рассчитанные на номинальное первичное напряжение $U_{1н}$, например, 500 в, к сети с любым меньшим значением напряжения U_1 , например, 380 в. Сечение обмотки a должно быть при этом, разумеется, рассчитано соответствующим образом.

При напряжении U_1 к сети должна приключаться часть обмотки a с числом витков $m w_a$, где $m = \frac{U_1}{U_{1н}}$.

Токи в частях обмотки a можно вычислить для k , большего или меньшего m , по формулам (8'), (9'), (10').

Ток во вторичной цепи ($k > m$):

$$I_b = I_2 \frac{w_2}{w_1}. \quad (8')$$

Ток в первичной цепи ($k < m$):

$$I_a = I_2 \frac{k}{m} \frac{w_2}{w_1} \quad (9')$$

Ток в общей цепи обмотки:

$$I_k = I_2 \left(1 - \frac{k}{m} \right) \frac{w_2}{w_1} \quad (10')$$

Расчеты показали, что вес первичной цепи универсального трансформатора с добавочной обмоткой, рассчитанного на номинальное напряжение 500 в, всего на 6,25% больше, чем трансформатора, рассчитанного только на одно первичное напряжение 380 в. В то же время вес меди универсального трансформатора с переключением числа витков первичной обмотки на 24% превышает вес меди трансформатора нормального типа. Универсальные трансформаторы с добавочной обмоткой дешевле трансформаторов с переключением числа витков и трансформаторов с добавочными автотрансформаторами.

3. СРАВНЕНИЕ ПОТЕРЬ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Сравним величину полных потерь: 1) в трансформаторе с переключением числа витков вторичной обмотки (трансформатор с наименьшим расходом активных материалов) (фиг. 4а); 2) в трансформаторе с переключением числа витков первичной обмотки (фиг. 4б); 3) в установке с трансформатором, питающимся от ступенчатого автотрансформатора (фиг. 4 в); 4) в трансформаторе с добавочной автотрансформаторной обмоткой (фиг. 4г).

Для всех схем считаем одинаковыми: однофазный броневой магнитопровод трансформатора, полное число витков и сечение меди его вторичной обмотки, а также сечения меди всей первичной цепи. Назовем коэффициентом регулирования величину

$$k = \frac{U_2}{U_{2\max}} \quad (11)$$

где U_2 — вторичное напряжение трансформатора на любой ступени регулирования, а $U_{2\max}$ — напряжение на высшей ступени. Потери в меди в схеме фиг. 4а при $k = 1$ и номинальном вторичном токе обозначим P_m ; примем, что потери в первичной и вторичной обмотках одинаковы. Током холостого хода при всех расчетах пренебрегаем. Потери в стали $P_c = \xi P_m$, где ξ лежит в пределах от 0,2 до 2,0 (значения ξ больше единицы для маломощных высоковольтных трансформаторов).

Общие потери в меди и стали для схемы фиг. 4а могут быть вычислены при номинальном токе и любом значении коэффициента регулирования по формуле

$$P(a) = P_m \frac{k(1+k)}{2} + \xi P_m \quad (12)$$

Первый член в формуле (12) и во всех последующих дает величину потерь в меди, а второй — в трансформаторной стали. При определении

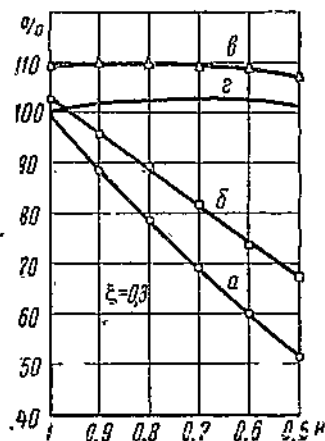
¹ При расчете принято, что половина обмотки a с отайками имеет то же сечение s , что и рассчитанная на 500 в обмотка b , а другая половина — сечение $0,5 s$.

потерь в стали трансформатора в дальнейшем приближенно считаем, что потери пропорциональны квадрату индукции, меняющейся в зависимости от величины коэффициента регулирования.

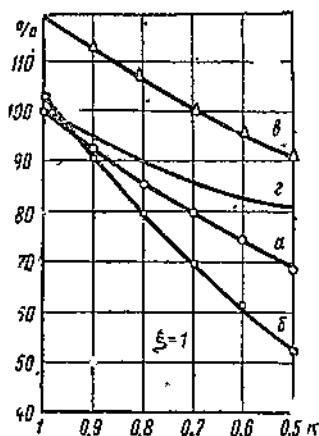
Общие потери в схеме фиг. 4б

$$p_{(б)} = p_m \frac{k+1,1}{2} + \xi p_m k^2. \quad (13)$$

При определении потерь в меди для схемы фиг. 4б принято увеличение на 10% по сравнению со схемой фиг. 4а среднего диаметра вторичной обмотки.



Фиг. 5. Относительные величины общих потерь для различных схем регулируемых трансформаторных устройств в зависимости от величины k при $\xi = 0,3$.



Фиг. 6. Относительные величины общих потерь для различных схем регулируемых трансформаторных устройств в зависимости от величины k при $\xi = 1$.

Рассмотрим схему фиг. 4в. Общие потери в трансформаторе

$$p_{тр} = p_m + \xi p_m k^2. \quad (14)$$

Общие потери в автотрансформаторе

$$p_{ат} = p_m \cdot 0,7k(1-k) + 0,4\xi p_m. \quad (15)$$

При выводе формулы (15) мы приняли, что индукция в автотрансформаторе равна наибольшей индукции в трансформаторе, а сечение его магнитопровода в два раза меньше; вес стали для автотрансформатора принят равным 0,4 от веса стали трансформатора.

Полные потери в системе

$$p_{(в)} = p_m [1 + 0,7k(1-k)] + \xi p_m (0,4 + k^2). \quad (16)$$

Потери в меди регулируемого трансформатора по схеме фиг. 4 г определяются аналогично расчету схемы а.

$$P' = P_M [1 + 0,75 k (1 - k)]. \quad (17)$$

При выводе учтено расположение добавочной обмотки на крайнем стержне.

Потери в стали равны:

$$P'' = \xi P_M [k^2 (2 - \alpha) + (\alpha - 1) (2k - 1)], \quad (18)$$

где α — часть потерь в стали, приходящаяся на долю среднего стержня при $k=1$. Для случая равенства потерь в стали в стержнях и в ядре $\alpha=0,25$. Общие потери в трансформаторе при этом составят:

$$P_{(2)} = P_M [1 + 0,75 k (1 - k)] + \xi P_M (1,75 k^2 - 1,5 k + 0,75). \quad (19)$$

На фиг. 5 и 6 приведены относительные величины потерь для разных схем в зависимости от значений коэффициента регулирования.

Общие потери в схеме на фиг. 4а при $k=1$ взяты за 100%; кривые фиг. 5 соответствуют $\xi=0,3$, а кривые фиг. 6 $\xi=1$. Из кривых видно, что потери в регулируемых трансформаторах меньше, чем в схемах, имеющих автотрансформаторные цепи. Потери в регулируемом трансформаторе схемы а, требующей наименьшего расхода меди, меньше, чем в схеме б, приблизительно до значения $\xi=0,6$; при больших значениях ξ потери в схеме а больше, чем в схеме б.

Последнее иллюстрируется фиг. 6. Очень важно отметить, что, как показали расчеты автора, потери в трансформаторе по схеме фиг. 4а, выполненном с тем же расходом меди и стали, как и трансформатор по схеме фиг. 4б, для значений $\xi > 0,74$ и при широких пределах регулирования (например, 1:2) больше, чем в трансформаторе по схеме фиг. 4б. Для малоомощных высоковольтных трансформаторов схема фиг. 4б ввиду меньших потерь и простоты конструкции более целесообразна, чем схема фиг. 4а.

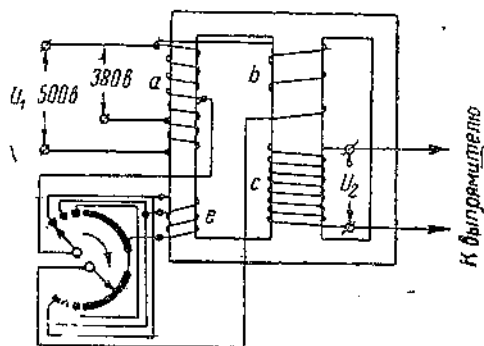
Как видно из фиг. 5 и 6 и как то следует из расчетов, проведенных для других величин, потери в трансформаторе по схеме фиг. 4г меньше, чем в трансформаторе по схеме фиг. 4в.

Из всего изложенного следует, что автотрансформатор не должен применяться для агрегатов электрофильтров. Для неспециальных агрегатов пригодны трансформаторы с переключением числа витков первичной обмотки, а для универсальных — с добавочной обмоткой [14].

4. ТРАНСФОРМАТОР С ДОБАВОЧНОЙ ОБМОТКОЙ И С ПОЛОВИННЫМ ЧИСЛОМ ОТПАЕК (СИСТЕМА АВТОРА)

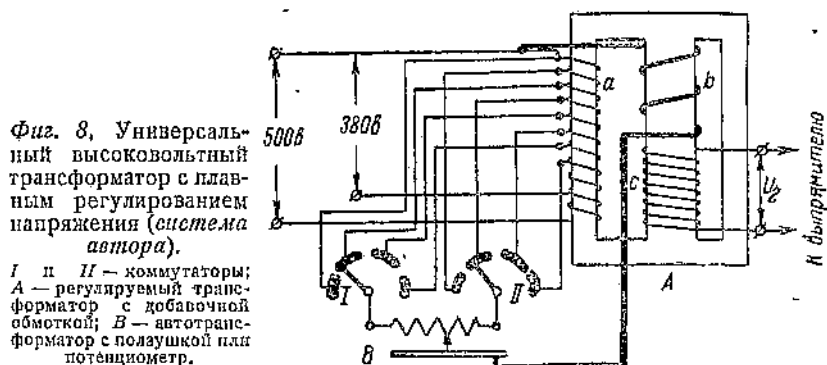
В некоторых случаях желательно иметь дистанционное регулирование напряжения при установке коммутатора вдали от высоковольтного трансформатора. Если применяется добавочный автотрансформатор, то он вместе с коммутатором может быть установлен на любом расстоянии от трансформатора, так как число проводов от автотрансформатора к трансформатору невелико — два для однофазного и три для трехфазного тока. При использовании регулируемого высоковольтного трансформатора дистанционное управление связано с необходимостью прокладки очень большого числа проводов. Число проводов, однако, может быть уменьшено в два раза, если применить предложенную автором оригинальную конструкцию универсального трансформатора с добавочной обмоткой [15].

Схема фиг. 7 поясняет устройство такого трансформатора, имеющего при том же числе ступеней регулирования вдвое меньшее число отпаек по сравнению с трансформатором, описанным ранее. Обмотка *b* подключена



Фиг. 7. Универсальный регулируемый трансформатор с добавочной автотрансформаторной обмоткой, имеющей половинное число отпаек (система автора).

посредством коммутатора с двумя одновременно передвигающимися рабочими щетками к первичной обмотке *a*, снабженной добавочной цепью *c*; последняя соединяется с обмоткой *a* в зависимости от положения щеток коммутатора, согласно или навстречу.



Фиг. 8. Универсальный высоковольтный трансформатор с плавным регулированием напряжения (система автора).

I и *II* — коммутаторы; *A* — регулируемый трансформатор с добавочной обмоткой; *B* — автотрансформатор с ползушкой или потенциометр.

5. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР С ПЛАВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВОК (СИСТЕМА АВТОРА)

В лабораторных установках электрофильтры должны иметь плавное регулирование напряжения.

Универсальный высоковольтный трансформатор с добавочной обмоткой легко может быть использован и для получения плавно регулируемого напряжения. Конструкция подобного трансформатора совершенно идентична описанной выше. Для плавной регулировки необходимо иметь два коммутатора и небольшой добавочный автотрансформатор со щеткой-ползушкой, перемещаемой по оголенной поверхности его обмотки

(автотрансформатор «вариак»). Вместо вариака может быть в некоторых случаях применен реостат Рустрата.

Схема соединений универсального высоковольтного трансформатора с коммутаторами и вариакром (или реостатом) приведена на фиг. 8. Нечетные отпайки обмотки *a* соединены с первым коммутатором, а четные—со вторым. Вариак, рассчитанный на напряжения, подходящее только на одну ступень обмотки *a*, исключен между обоими коммутаторами. Регулирование осуществляется постепенным переводом щеток коммутаторов и передвижкой ползунки вариака или соответственно реостата.

Фирма Сименс практиковала регулирование посредством двух коммутаторов и вариака для низковольтных ступенчатых автотрансформаторов рентгеновских аппаратов. Для регулируемых высоковольтных трансформаторов с добавочной обмоткой эта система впервые предложена автором. Полагая, что подобные трансформаторы получают применение не только для лабораторных фильтров.

6. СТУПЕНЧАТЫЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ И КОММУТАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Для регулирования вторичного напряжения высоковольтных трансформаторов с неизменным коэффициентом трансформации чрезвычайно широко применяются ступенчатые автотрансформаторы с коммутатором, в частности, и во всех советских агрегатах. Автотрансформаторы—сухие, без масляного охлаждения. Число вольт на виток в них обычно близко к единице.

Советский автотрансформатор ЭТН-165 для номинального первичного напряжения 500/380 в имеет 470 витков из провода ЛВОО сечением $3,8 \times 6,9$ мм², одинаковым по всей длине обмоток. Вес меди 31,46 кг; вес стали 85 кг. Диаметр сердечника 128 мм.

Конструкция ступенчатых автотрансформаторов не имеет каких-либо особенностей. При конструировании автотрансформатора следует стремиться к возможному уменьшению его индуктивного сопротивления. Напряжение регулируется изменением числа витков вторичной цепи мощностью коммутатора.

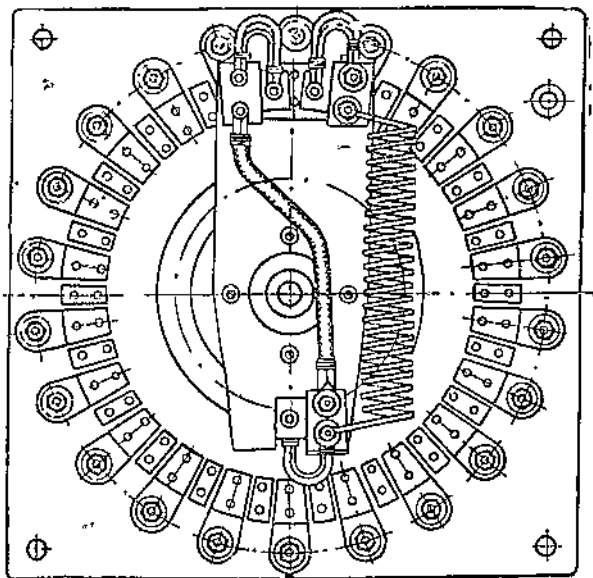
На фиг. 9 показан коммутатор на 21 ступень, применяемый в советских агрегатах для электрофильтров. Коммутатор состоит из мраморной плиты, на которой по окружности размещены контакты, а также кольцо для съема тока. Между контактами расположены вспомогательные пластины. К рабочим контактам присоединены отпайки ступенчатого автотрансформатора. По контактам скользят две щетки—главная и добавочная. Они соединены между собой сопротивлением—никельниевой спиралью. Щетки закреплены на траверсе, поворачиваемой при помощи вала со штурвалом.

Рабочая щетка соединена с другой, скользящей по кольцу. Ширина рабочей щетки меньше промежутка между двумя соседними контактами. Когда главная щетка сходит с рабочего контакта, ее место занимает добавочная щетка.

Таким образом регулирование происходит без разрыва цепи. Междущеточное сопротивление необходимо для предотвращения замыкания коротко отдельных ступеней обмотки при повороте коммутатора. Сопротивление рассчитывается на кратковременную работу только при регулировании. Механическое устройство коммутатора исключает возможность остановки добавочной щетки на каком-либо рабочем контакте.

Во время стационарного режима на рабочем контакте автоматически всегда находится главная щетка. Щетки графитно-медные; сопротивление спирали 0,2 ом.

Коммутатор — наиболее уязвимое место агрегата. Большинство аварий агрегатов связано с порчей коммутатора, что часто вызывается от-



Фиг. 9. Коммутатор для переключения числа витков под нагрузкой (конструкция Московского рентгеновского завода).

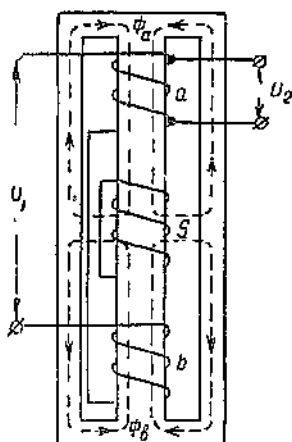
сутствием правильного ухода. Из этих соображений целесообразно применять для самых мощных агрегатов специальные регулировочные автотрансформаторы. Лучшим из них следует считать автотрансформатор системы Норриса.

7. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ СИСТЕМЫ НОРРИСА

Автотрансформаторы системы Норриса [18], не имеющие переключаемых и скользящих контактов и гибких подвижных электрических проводов, являются самыми надежными современными устройствами для плавного бесконтактного регулирования напряжения. Автотрансформатор имеет броневого магнитопровод, на среднем стержне которого расположены две неподвижные обмотки *a* и *b*, включенные последовательно в питающую сеть (фиг. 10).

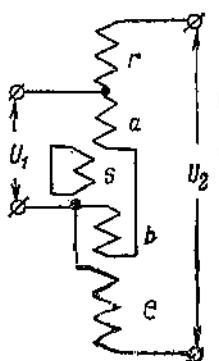
Магнитные потоки, создаваемые обмотками *a* и *b*, направлены навстречу друг другу и, следовательно, замыкаются по воздуху. Поверх этих неподвижных обмоток может передвигаться короткозамкнутая подвижная катушка *S*.

При приближении катушки к одной из неподвижных обмоток индуктивное сопротивление последней уменьшается. При этом индуктивное сопротивление второй неподвижной обмотки, от которой удаляется короткозамкнутая катушка S , увеличивается. Таким образом передвижение катушки S изменяет индуктивное сопротивление, а следовательно, и напряжения на неподвижных обмотках a и b . Регулируемое вторичное напряжение может быть получено непосредственно от одной из неподвижных обмоток. Для получения требуемых величин наименьшего и наибольшего вторичных напряжений обычно приходится помещать на сердечнике еще одну или две добавочные обмотки r и e (фиг. 11).



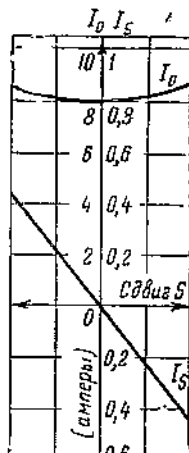
Фиг. 10. Автотрансформатор с подвижной короткозамкнутой обмоткой системы Норриса.

S — подвижная обмотка; a и b — первичные обмотки.



Фиг. 11. Схема соединений обмоток автотрансформатора сист. Норриса

S — подвижная короткозамкнутая катушка; r и e — добавочные обмотки.

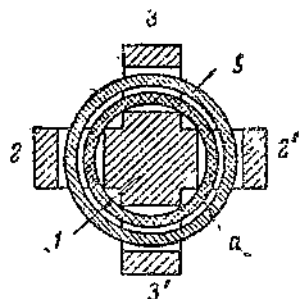


Фиг. 12. Зависимость при холостом ходе величин I_0 и I_S от положения подвижной катушки.

Возможен ряд вариантов схем соединений обмоток автотрансформатора Норриса. Приведенная на фиг. 11 схема вполне пригодна для регулировочных автотрансформаторов электрофильтров. В работе автора и Б. В. Беляева [19] приведены различные схемы соединений и данные, позволяющие выбрать и рассчитать наилучшую схему для требуемых параметров регулятора.

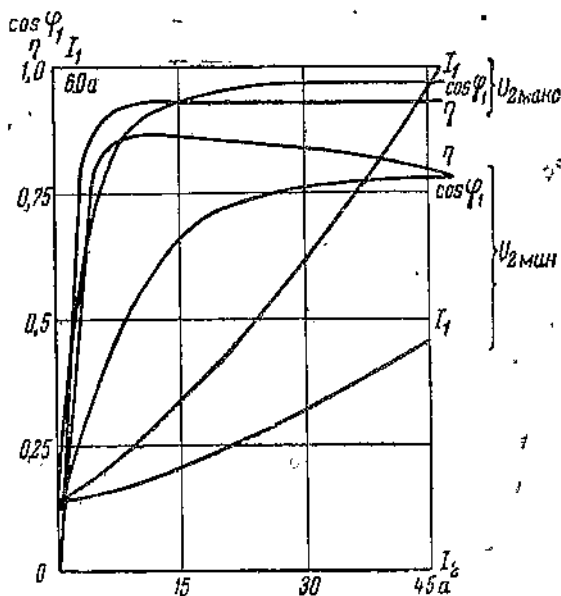
Ток в катушке S прямо пропорционален току нагрузки. При холостом ходе в короткозамкнутой катушке S протекает ничтожно малый ток I_S . Его величина зависит от положения катушки; при симметричном положении катушки S относительно обмоток a и b ток I_S равен нулю. На фиг. 12 приведены кривые зависимостей тока I_S и тока холостого хода I_0 от положения подвижной катушки регулятора для электрофильтра (проходная мощность регулятора 20 ква). Анализ режима холостого хода трансформатора Норриса приведен в статье автора и доц. Б. В. Беляева [20].

Ввиду большой длины пути магнитного потока в воздухе намагничивающий ток регулятора Норриса имеет относительно значительную величину. Для его уменьшения применяют броневой магнитопровод с узкими окнами. Стержни должны быть длинными и сечение их прямоугольным с отношением сторон от 1:4 до 1:6. Малая величина тока



Фиг. 13. Поперечное сечение автотрансформатора системы Норриса с разветвленным яром магнитопровода.

a — неподвижная обмотка; S — короткозамкнутая подвижная катушка; $1, 1'$ — сердечник; $2, 2', 3, 3'$ — боковые стержни.



Фиг. 14. Зависимости $\cos \varphi_1$, η и I_1 от I_2 при активной нагрузке автотрансформатора системы Норриса при двух крайних положениях подвижной катушки (регулятор Московского рентгеновского завода мощностью 20 квт).

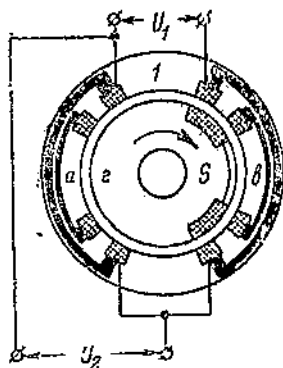
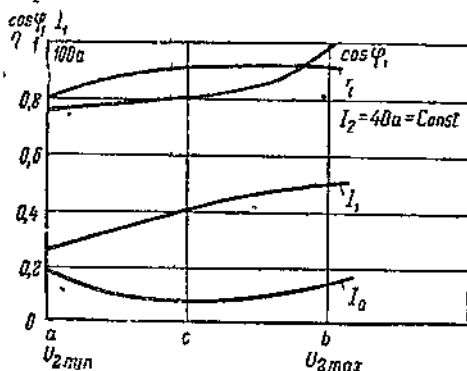
холостого хода может быть достигнута путем применения бронзового магнитопровода с разветвленным в двух плоскостях яром. На фиг. 13 изображено поперечное сечение такого автотрансформатора.

Чрезвычайно важно подчеркнуть, что при подобном магнитопроводе обмотки не прямоугольные, а круглые. Эту новейшую английскую конструкцию целесообразно применить и у нас.

Намагничивающий ток правильно рассчитанного автотрансформатора невелик и $\cos \varphi$ достаточно высок.

До Отечественной войны на Московском рентгеновском заводе по нашим чертежам [19] была построена модель автотрансформатора системы Норриса для электрофильтра с проходной мощностью 20 ква; схема соединений обмоток приводилась выше. На фиг. 14 приведены кривые зависимостей $\cos \varphi_1$, к. п. д. и первичного тока I_1 от тока активной нагрузки I_2 для двух крайних положений подвижной катушки S . На фиг. 15 приведены кривые зависимостей $\cos \varphi_1$, к. п. д., тока I_1 и тока в обмотках a и b от положения катушки S при неизменном токе нагрузки $I_2 = 40$ а [19]. Приведенные данные испытаний показывают, что регулятор имеет хорошие характеристики.

Фиг. 15. Зависимости I_1 , I_a , $\cos \varphi_1$ и η от положения подвижной катушки при $I_2 = \text{const}$ (регулятор Московского рентгеновского завода мощностью 20 ква).



Фиг. 16. Устройство автотрансформатора с короткозамкнутой обмоткой на поворачиваемой части сердечника (конструкция автора и Б. В. Беляева).

1 — часть магнитопровода с неподвижными обмотками a и b ; 2 — внутренняя поворотная часть магнитопровода с короткозамкнутой обмоткой S .

Единственный недостаток автотрансформатора Норриса — большой расход меди для обмоток.

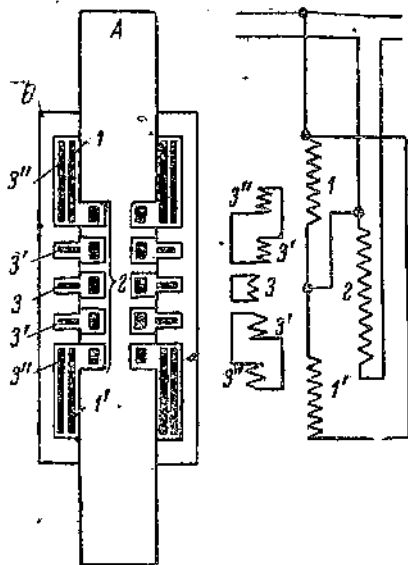
Нами предложена [20] модификация регулятора, представляющая собой автотрансформатор с короткозамкнутой обмоткой, помещенной на поворачиваемой внутренней части магнитопровода (фиг. 16). Для такого регулятора требуется значительно меньше меди. Недостатком этой конструкции является сильный шум при работе. Это, однако, мало существенно для электрофильтров с механическими выпрямителями.

В заключение укажем, что в тех случаях, когда регуляторы должны быть сконструированы для агрегатов с механическими выпрямителями, следует добиваться неизменного сдвига фазы вторичного напряжения относительно первичного во всем диапазоне регулирования.

8. АВТОТРАНСФОРМАТОР С ПЕРЕДВИЖНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Европейские заводы применяют для плавного регулирования напряжения агрегатов электрофильтров автотрансформаторы с передвижным сердечником, впервые разработанные фирмой Кох и Штерцель.

В СССР имеется несколько трехфазных установок с такими регуляторами. Эти регуляторы подробно изучены Московским рентгеновским заводом. Трехфазный автотрансформатор с передвижным сердечником принципиально не отличается от однофазного.



Фиг. 17. Автотрансформатор с передвижным сердечником. (система фирмы Кох и Штерцель).

1, 1' — части первичной обмотки; 2 — вторичная обмотка; 3, 3', 3'' — компенсационные обмотки; А — неподвижный сердечник; В — подвижная часть магнитопровода.

Автотрансформаторы с подвижным сердечником значительно дороже и хуже автотрансформаторов системы Норриса, поэтому в СССР изготовление их не рекомендуется. В случае необходимости нужно применять регуляторы Норриса или при малой мощности аппаратов вариаки. Большого внимания заслуживают швейцарские вариаки с передвижением щетки-ползушки по спирали.

9. МНОГОФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Конструкция европейских трехфазных высоковольтных трансформаторов в основном близка к описанной для однофазных агрегатов. Магнитопровод — стержневой. Первичная и вторичная обмотки соединены в звезду. Специфической особенностью является вывод нулевой точки вторичной обмотки [32]. Это делается для подключения особого балластного

сопротивления, применяемого при работе трехфазного высоковольтного механического выпрямителя. Регулировочный автотрансформатор обычно трехфазный.

Более целесообразно было бы применять два однофазных автотрансформатора, соединенных в открытый треугольник [21.] Подобная система при ступенчатых автотрансформаторах дает существенную экономию за счет меньшей стоимости коммутаторов. Она целесообразна и при использовании регуляторов системы Норриса.

Отметим, что трехфазный высоковольтный трансформатор может быть легко выполнен универсальным и регулируемым. Схема устройства такого трансформатора компактной конструкции предложена автором [13].

Для выпрямителя СБ необходимы два однофазных высоковольтных трансформатора или один специальный. В статье автора и доц. Б. В. Беляева «Трансформация напряжения и числа фаз при питании двухфазного выпрямителя СБ от трехфазной сети» [87] подробно освещен вопрос о схемах соответствующих трансформаторов и автотрансформаторов. Здесь мы только укажем дополнительно, что высоковольтные трансформаторы могут быть регулируемы и при выпрямителе СБ. По мнению автора в настоящее время многофазные трансформаторы и агрегаты не следует изготовлять; это является задачей будущего. В настоящее время следует изготовлять только однофазные агрегаты.

10. ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ФИЛЬТРОВ

В Америке широко распространены фильтры для очистки воздуха с применением однофазных трансформаторов со вторичным напряжением 6 и 12 кв. Особенностью конструкции магнитопроводов этих трансформаторов является наличие магнитного шунта. Для получения меньших токов при пробое в фильтре первичная и вторичная обмотки расположены на разных стержнях. Стандартные агрегаты выпускаются без регулирования напряжения.

Глава 6

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ (СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ)

Для выпрямления высокого напряжения порядка 30—100 кв возможно применение кенотронов, газотронов, тиратронов, сухих и механических выпрямителей. Другие типы вентиляей, в частности высоковольтные ртутные выпрямители и дуговые выпрямители системы Маркса, до сих пор не применяют для электрической очистки газов и нет оснований предполагать, что они будут применяться в ближайшем будущем. В СССР во всех промышленных установках для газоочистки пользуются механическими выпрямителями. В Англии имеются отдельные установки с сухими (меднозакисными) выпрямителями. В Америке изготавливаются промышленные агрегаты с газотронами или кенотронами.

Разные типы выпрямителей имеют свои достоинства и недостатки. Сухие выпрямители теперь чрезвычайно дороги при высоких напряжениях; английский сухой выпрямитель очень громоздок—его размеры вместе с баком близки к размерам высоковольтного трансформатора. Сухие выпрямители, однако, очень надежны и если удастся резко уменьшить стоимость, то безусловно будет целесообразно применение их в СССР. В настоящее время в СССР ведется интенсивная разработка сухих вентиляей, например, селеновых.

Применение кенотронов, газотронов и тиратронов на первый взгляд очень заманчиво. В действительности же кенотроны обладают следующими крупнейшими недостатками: 1) недолговечность; срок службы кенотронов очень мал—всего около 1 000 час.; 2) легкая повреждаемость при коротких замыканиях в фильтре; 3) необходимость трансформаторов накала, что делает однофазную установку громоздкой; 4) высокая стоимость: комплект из четырех кенотронов с трансформаторами накала стоит в три раза больше, чем однофазный механический выпрямитель; 5) большое падение напряжения; 6) необходимость сложной автоматики.

Эти же недостатки целиком, за исключением пункта пятого, присущи и газотронам. Агрегаты для электрофильтров работают, особенно в установках химической промышленности, в специфически трудных условиях. Они устанавливаются в отравленной газами атмосфере и, как правило, обслуживаются малоквалифицированным персоналом. Практически, за ними плохой уход. Короткие замыкания, пробой в фильтре—весьма вероятны. По мнению автора кенотроны, тиратроны и газотроны непригодны для фильтров, используемых в химической промышленности. Их можно применять только в установках для очистки дымовых газов на электростанциях, где условия работы позволяют установить надлежащий уход. Тенденция современной техники направлена к внедрению электронных и ионных вентиляей, в частности тиратронов. Однако до войны качество наших вентиляей было несравненно ниже, чем механических выпрямителей, а поэтому можно считать, что в течение ближайших лет в СССР кенотроны и газотроны для электрофильтров применяться не будут. Нашим заводам необходимо заняться улучшением качества высоковольтных кенотронов и разработкой высоковольтных тиратронов. Срок службы этих вентиляей должен быть не меньше чем 10 000 час.

Механические выпрямители очень просты по конструкции, надежны и долговечны. Уход за ними весьма прост. Автор считает их наиболее подходящим типом выпрямителя для доменных электрофильтров. Недостатки их: 1) сильное искрение, отчего в воздухе появляются окислы азота; 2) резкий шум при нагрузке; 3) вредное влияние на радиоприем из-за больших радиопомех. Существующие способы борьбы с радиопомехами (экранирование, установка специальных дросселей) позволяют применять механические выпрямители. Полагаем, что они будут применяться еще много лет.

Глава 7

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Высоковольтные механические выпрямители изготовляют для однофазных, полуволновых и трехфазных агрегатов. В СССР выпускались исключительно однофазные механические выпрямители. В Америке применяют однофазные и полуволновые выпрямители. В Германии фирма Сименс-Лурги выпустила много трехфазных механических выпрямителей, главным образом для очистки доменного газа. В СССР имеется несколько трехфазных импортных агрегатов.

Трехфазно-двухфазный механический выпрямитель СБ, изобретенный автором, в 1934 г. [35], изготовлен в качестве опытной модели Московским рентгеновским заводом.

1. ОДНОФАЗНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Однофазные выпрямители имеют наибольшее распространение и нашей промышленностью должны изготавливаться в первую очередь.

Для выпрямления переменного напряжения с частотой 50 гц используются выпрямителями с числом оборотов 1 500 или 3 000 об/мин.

Целесообразнее изготавливать выпрямители с числом оборотов коммутатора, равным 1 500 об/мин. При 3 000 об/мин очень трудно получить надежную конструкцию; выпрямители с меньшим числом оборотов требуют большого числа контактов и поэтому слишком сложны.

В дальнейшем речь будет идти только об однофазных выпрямителях на 1 500 об/мин. Советские выпрямители изготавливались также на это число оборотов.

Механический выпрямитель является синхронно-вращающимся переключателем, при помощи которого периодически меняется порядок подключения зажимов цепи электрофильтра к зажимам вторичной обмотки трансформатора. На фиг. 18 приведена принципиальная схема соединений и показано устройство однофазного механического выпрямителя. Коммутатор изготавливается из изоляционного материала в виде креста, к лопастям которого приделаны два дуговых контакта из алюминия; в американских выпрямителях эти контакты изготавливают из полосовой меди. Вокруг креста расположены четыре неподвижных контакта — щетки 1, 2, 3 и 4. Щетки сдвинуты одна относительно другой на 90°. Щетки 1 и 3 соединены со вторичной обмоткой трансформатора. Со щеток 2 и 4 получают выпрямленное напряжение.

В советских выпрямителях щетки изготовлены из алюминиевых дуг. Американцы делают щетки в виде двоянных шаров. Эта конструкция более рациональна и ее следует внедрить и у нас. Между щетками и крестом оставляется небольшой зазор в 1—3 мм. Крест делается из гетинакса или из пропитанного дерева. В иностранных выпрямителях часто вместо креста ставят текстолитовый диск со срезанными краями. Целесообразнее применять крест, так как он надежнее. При пробое креста достаточно заменить одну его лопасть, а при пробое диска нужно менять весь диск целиком.

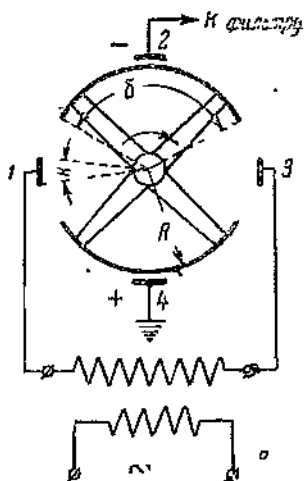
Цепь электрофильтра подключается к зажимам вторичной обмотки трансформатора лишь в течение промежутка времени, когда происходит замыкание контактов и горит электрическая дуга размыкания. Величина угла поворота креста, при котором происходит непосредственное замыкание контактов, за время одного полупериода напряжения определяется формулой

$$\beta = k + \delta - \frac{\pi}{2}, \quad (20)$$

где k и δ — центральные углы, указанные на фиг. 18.

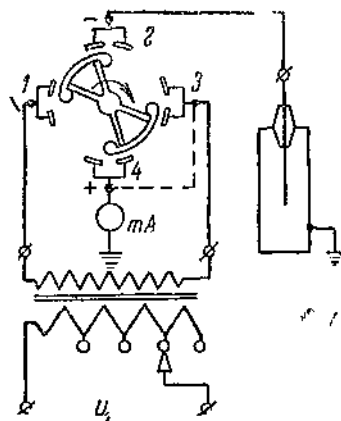
Угол β , выраженный в электрических градусах, назовем углом непосредственного замыкания. Угол поворота креста, соответствующий горению дуги размыкания, назовем углом размыкания γ . Весь угол поворота, соответствующий протеканию тока через выпрямитель, назовем углом выпрямления. Он практически равен сумме углов β и γ , так как можно пренебречь электрической дугой, возникающей при сближении контактов.

Величина угла β для однофазных выпрямителей разных заводов лежит в пределах от 70 до 100 электрических градусов. Угол непосредственного замыкания у существующих выпрямителей постоянен. Мы рекомендуем делать его изменяемым. Это позволит при монтаже выпрями-



Фиг. 18. Однофазный высоковольтный механический выпрямитель.

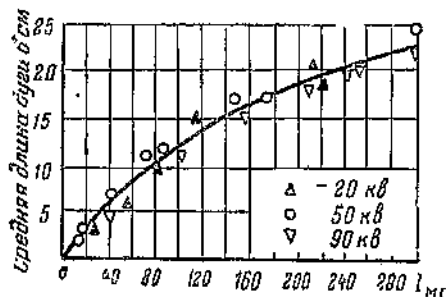
1, 2, 3 и 4 — щетки.



Фиг. 19. Однофазный полуволновой высоковольтный механический выпрямитель МВ с раздвижными щетками (система автора).

1, 2, 3 и 4 — щетки.

теля на установке менять величину угла замыкания в зависимости от электрической емкости фильтра. При малой емкости фильтра следует иметь возможно больший угол замыкания, и наоборот.



Фиг. 20. Зависимость длины дуги размыкания от тока нагрузки при 20, 50 и 90 кВ (выпрямитель Московского рентгенового завода, нагрузка активная).

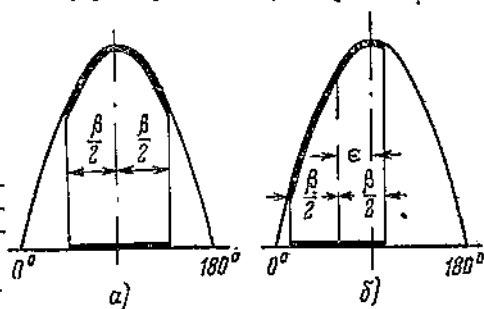
Рационально делать неподвижные щетки из двух раздвигаемых частей, электрически соединенных между собой гибким проводом [26]. Обеим частям щетки следует придавать шарообразную форму (фиг. 19).

Угол размыкания растет с увеличением тока и не зависит от величины выпрямленного напряжения.

Фиг. 20 подтверждает сказанное. На кривой показаны опытные точки, полученные при измерении дуги размыкания для разных токов и выпрямленных напряжений [22], [25]. Опыты проводились при чисто активной нагрузке выпрямителя конструкции Московского рентгеновского завода. Угол выпрямления даже при значительной перегрузке меньше 180° электрических градусов и, следовательно, цепь электрофильтра периодически отключается от трансформатора. На осциллограмме фиг. 21



Фиг. 21. Осциллограммы выпрямленного тока I_g и первичного напряжения U_1 трансформатора.



Фиг. 22. Части полуволны вторичного напряжения трансформатора при холостом ходе.

а) угол $z = 0$; б) угол $z > 0$.

изображены кривые выпрямленного тока и первичного напряжения трансформатора. Легко видеть, что в некоторые промежутки времени ток действительно равен нулю.

При питании электрофильтра однофазным трансформаторно-выпрямительным агрегатом возникают перенапряжения. Явления крайне сложны и сопровождаются электрическими колебаниями с разными частотами. Подробно этот процесс исследован канд. техн. наук С. Е. Ростковской [24].

В однофазных высоковольтных механических выпрямителях (фиг. 18) имеет место двухкратный разрыв цепи выпрямленного тока. Увеличивать число разрывов не следует, так как опытные данные показывают, что при двухкратном, трехкратном и четырехкратном разрывах длина дуги размыкания под одной щеткой практически неизменна [22]. Предельная мощность однофазного выпрямителя ограничивается электрическими дугами размыкания, сильно разрушающими контакты.

Величина выпрямленного тока и длина электрической дуги размыкания зависят от того, в какой момент в течение каждого полупериода происходит непосредственное замыкание контактов.

На фиг. 22 изображена полуволна вторичного напряжения трансформатора и показана часть ее, соответствующая углу β для двух разных начальных моментов замыкания контактов; в первом случае получается при холостом ходе наибольшее значение выпрямленного напряжения E_{g0} . Для других начальных моментов замыкания напряжение холостого хода E_g меньше и определяется формулой

$$E_g = E_{g0} \cos \epsilon. \quad (21)$$

Угол ϵ , показанный на фиг. 22, называется электрическим углом регулирования. Во всех современных конструкциях однофазных механических выпрямителей можно изменять начальный момент

замыкания, т. е. величину угла ϵ . Регулирование осуществляется двумя способами: 1) поворотом статора синхронного двигателя, вращающего крест или диск, и 2) сдвигом по окружности щеток выпрямителя. Следует предпочесть первый способ регулирования, так как конструкция выпрямителя при этом несравненно компактнее. В советских агрегатах статор двигателя можно поворачивать относительно оси на 25° . Желательно увеличение этого угла для новых агрегатов.

При правильной эксплуатации электрофильтра угол ϵ приходится изменять очень редко. Обычно его подбирают при монтаже установки и меняют только при резких изменениях параметров очищаемого газа. Угол ϵ берут таким, чтобы иметь большой ток и главное спокойную работу креста. Трудно отрегулировать выпрямитель при большой электрической емкости фильтра, так как незначительное изменение угла ϵ резко отражается на режиме и выпрямитель может работать только в очень узком диапазоне регулирования. Крест однофазного выпрямителя вращается трехфазным синхронным реактивным двигателем.

В однофазных агрегатах ТУ-200 Рентгеновского завода применяется реактивный двигатель мощностью 400 вт с вертикальным валом. Двигатель вместе с горизонтально расположенным крестом выпрямителя смонтирован на крышке бака высоковольтного трансформатора (фиг. 2). Крест вращается между четырьмя изоляторами с укрепленными на них щетками. Через два изолятора выводятся концы вторичной обмотки трансформатора, третий используется как консерватор для масла (от его щетки отводится ток к коронирующему электроду), через четвертый изолятор проходит провод с током от положительной щетки к цепи осадительного электрода. Полная высота трансформатора с выпрямителем 1195 мм, ширина 695 мм и длина 900 мм.

Монтаж выпрямителя на баке трансформатора не целесообразен, так как конструкция агрегата получается мало надежной.

В заключение укажем путь расчета однофазного высоковольтного выпрямителя, данный автором и инж. Г. В. Голодолупским в работе «Расчет коммутрующих устройств механических выпрямителей» [26]. Приведем лишь конечные формулы для определения размеров креста с нераздвижными щетками (фиг. 18).

Величины центральных углов k и δ :

$$k = \frac{\beta}{2}; \quad \delta = \frac{\beta + \alpha}{2}. \quad (22)$$

Радиус креста

$$R = \frac{2,5 U_m - 25,9}{4,47} \text{ см}, \quad (23)$$

где U_m — амплитудное значение выпрямленного напряжения в киловольтках.

2. СИНХРОННЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Для вращения высоковольтных механических выпрямителей всех систем применяют трехфазный реактивный двигатель. Статор двигателя совершенно подобен статору трехфазной асинхронной машины. Ротор выполняется с явно выраженными полюсами и обычно имеет короткозамкнутую обмотку. Последняя служит в основном для пуска. Реактивные

двигатели обычно делают из готовых асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами. Мощность выбираемой модели должна быть примерно в 2,5 раза больше требуемой от реактивного двигателя. Переделка ротора заключается в выточке широких впадин. Станину статора переделывают так, чтобы можно было его поворачивать для изменения угла α .

Принцип работы реактивного двигателя следующий. Обмотка статора создает вращающееся магнитное поле. Магнитное сопротивление имеет наименьшую величину вдоль полюсов ротора, так как здесь меньше зазор между статором и ротором. Вращающееся поле, сжимаясь, проходит вдоль полюсов ротора, приводит его во вращение. Синхронное вращение ротора происходит исключительно за счет наличия явно выраженных полюсов¹. Мощность трехфазного реактивного двигателя определяется по формуле

$$P = 1,5 U_{\phi} \frac{(X_l - X_g) \sin 2\theta}{\phi (X_l + X_s)(X_g + X_s)}, \quad (24)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение; X_l и X_g — реактансы продольной и поперечной реакций; X_s — реактанс рассеяния; θ — угол между вектором напряжения и осью полюса.

Из этого выражения видно, что синхронная работа двигателя возможна лишь при явно выраженных полюсах, т. е. при $X_l \neq X_g$. Величина мощности зависит от соотношения X_g и X_l . Последнее определяется отношением ширины полюсной дуги к полюсному делению α . Наибольшая мощность двигателя имеет место при $\alpha \approx 0,5$; в этом случае

$\frac{X_g}{X_l} = 0,22$ [27]. $\cos \varphi$ трехфазного реактивного двигателя невелик, обычно не превышает 0,5. Вследствие этого невысок также и к. п. д.; его значения примерно на 20% меньше, чем у асинхронного двигателя равной мощности.

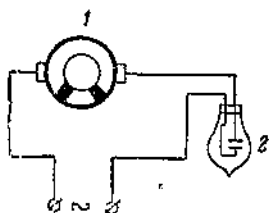
Пуск реактивного двигателя весьма прост и подобен пуску асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Для улучшения пусковых свойств и устранения качаний иногда помещают медные шипы во впадинах между полюсами.

Явно выраженные полюсы ротора реактивного двигателя при пуске в ход располагаются произвольно относительно полюсов вращающегося магнитного поля. Каждый полюс ротора может находиться под северным или под южным полюсом поля. В результате щетка выпрямителя, отводящая ток к коронирующему электроду, может быть как отрицательной, так и положительной. Для получения правильного знака напряжения на щетке обычно устанавливают специальное приспособление.

В большинстве агрегатов, в том числе и советской конструкции, имеется переключатель проводов цепи первичной обмотки трансформатора, позволяющий получать нужную полярность цепи выпрямленного напряжения. Отметим, что быстро отключая и включая двигатель, всегда можно получить правильную полярность и, следовательно, переключатель не является безусловно необходимым. Для предварительного (до включения фильтра) определения полярности щеток выпрямителя применяется особое приспособление, снабженное неоновой лампой или стрелочным прибором. В отечественных выпрямителях пользуются следующим устройством. На вал реактивного двигателя насажен медный комму-

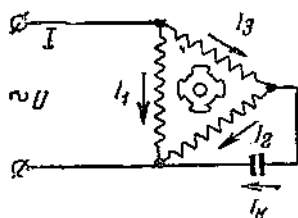
¹ Пренебрегаем гистерезисным моментом.

тор, состоящий из двух неравных контактных дужек, отделенных друг от друга изоляционным промежуточком (фиг. 23). Коммутатор электрически изолирован от вала двигателя. По окружности дуг расположены две щетки, входящие в цепь неоновой лампы. Неоновая лампа приключена к проводам сети, питающим трансформаторно-выпрямительный агрегат. В зависимости от расположения полюсов ротора реактивного двигателя



Фиг. 23. Схема устройства указателя полярности.

1 — коммутатор на валу двигателя;
2 — неоновая лампа.



Фиг. 24. Схема включения трехфазного реактивного двигателя в однофазную сеть.

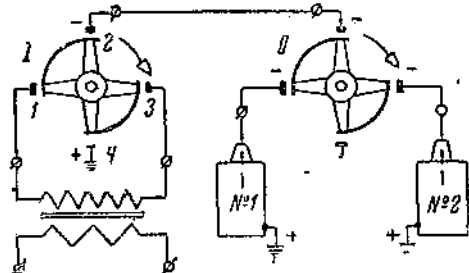
один из двух электродов неоновой лампы светится и, следовательно, можно судить о том, получена ли правильная полярность на щетках выпрямителя.

В заключение отметим, что трехфазные реактивные двигатели могут питаться и от однофазной сети [28]. При этом для их включения нужны лишь добавочные конденсаторы. На фиг. 24 приведена одна из возможных схем соединения.

Работа трехфазного реактивного двигателя в качестве конденсаторного может представить интерес в тех случаях, когда устанавливается всего один однофазный или полуволновой агрегат для электрофильтра.

3. ПОЛУВОЛНОВЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

В Америке выпускаются агрегаты для одновременного (поочередного) питания двух камер фильтра полуволновым напряжением. Выпря-



Фиг. 25. Принципиальная схема устройства американского полуволнового выпрямителя для питания двух камер.

I — выпрямитель; II — распределитель; Аз 1, Аз 2 — камеры фильтра; 1, 2, 3 и 4 — щетки.

митель имеет два вращающихся коммутационных креста с контактными дугами (фиг. 25). Кресты помещены на одном валу синхронного двигателя, делающего 1800 об/мин при частоте в 60 пер/сек.

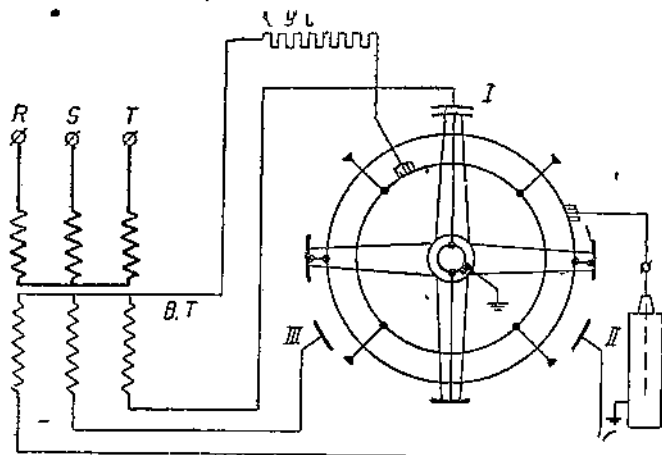
Первый коммутатор выпрямляет вторичное напряжение однофазного высоковольтного трансформатора, а второй его распределяет. В течение одного полупериода напряжения ток протекает в одну камеру фильтра, в течение другого полупериода — во вторую камеру. Легко заметить, что трансформатор нагружен в оба полупериода и, следовательно, хорошо используется [29], [30].

Американский выпрямитель несколько громоздок. Конструкция с двумя коммутаторами мало удобна для установки на баке трансформатора. Несомненно, целесообразнее выпрямитель подобной системы, но только с одним коммутатором. Ю. А. Скорецкий и И. Н. Востоков предложили в 1944 г. оригинальную конструкцию полувольнового выпрямителя с одним коммутатором [31].

Очень легко приспособить нормальный однофазный агрегат для питания только одного фильтра полувольновым напряжением. Для этого следует снять щетки 3 и 4 и соединить наглухо идущие к ним провода; соединение показано пунктиром на фиг. 19. При работе полувольнового выпрямителя возможна весьма значительная разность в амплитудах рабочей и холостой полуволн напряжения трансформатора. Борьба с этим явлением следует путем устройства воздушного зазора в магнитопроводе трансформатора.

4. ТРЕХФАЗНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Трехфазный механический выпрямитель для агрегатов электрофильтров имеет весьма сложную конструкцию.

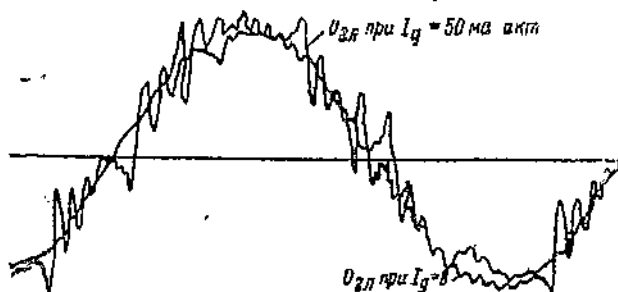


Фиг. 26. Принципиальная схема устройства трехфазного высоковольтного механического выпрямителя.

У. С. — успокоительное балластное сопротивление; В. Т. — высоковольтный трансформатор; I, II и III — неподвижные щетки.

На фиг. 26 изображена упрощенная принципиальная схема соединений и устройства трехфазного агрегата для электрофильтра. Трехфазный выпрямитель состоит в основном из двух крестов и трех контактных колец — двух большого диаметра и одного малого.

Цепь фильтра при помощи щеток приключена заземленным концом к малому кольцу, а высоковольтным отрицательным полюсом к кольцу большого диаметра. Оба указанные кольца электрически соединены с контактами лопастей рабочего креста. Трехфазное линейное напряжение подведено к трем неподвижным щеткам I, II и III, расположенным по окружности креста и взаимно сдвинутым на 120° . Второй крест с четырьмя контактами, соединенными со вторым кольцом большого диаметра, служит для приключения успокоительного активного сопротивления. Последнее приключено одним концом к нулевой точке вторичной трехфазной обмотки высоковольтного трансформатора, а дру-



Фиг. 27. Осциллограммы линейных напряжений трансформатора при холостом ходе и активной нагрузке трехфазного выпрямителя.

гим при помощи контактной щетки—ко второму кольцу большого диаметра. Механический выпрямитель вращают со скоростью 1500 об/мин (при частоте сети 50 гц).

Из сказанного выше можно установить следующее: цепь нагрузки сначала приключается к фазам I и II, затем один конец ее отключается от фазы I и спустя некоторый промежуток времени приключается к фазе III; с этого момента цепь нагрузки приключена к фазам II и III. Вслед за этим другой конец цепи нагрузок отключается от фазы II и спустя некоторое время приключается к фазе I. Цепь нагрузки приключена с этого момента к фазам III и I. Затем конец цепи нагрузки, приключенный к фазе III, отключается и через некоторое время приключается к фазе II. После этого процесс переключений повторяется [32].

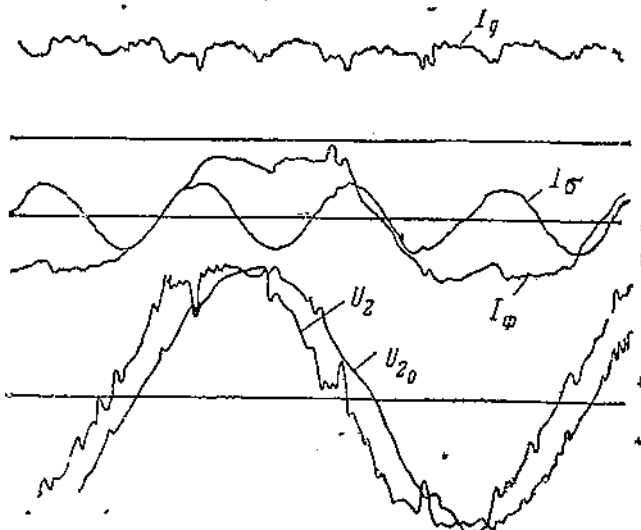
Цепь нагрузки непосредственно приключается к трансформатору шесть раз за период и каждый раз на протяжении всего лишь 30 электрических градусов. Как следует из описания процесса коммутации цепи нагрузки, в выпрямителе нет мгновенных переключений, а имеет место каждый раз однополюсное отключение и затем только приключение к другой фазе. Благодаря такой последовательности отключений и включений в трехфазном выпрямителе при нагрузке возникает электрическая дуга размыкания; форма кривой вычитанного напряжения резко зависит от величины нагрузки.

Длина дуги размыкания в трехфазном выпрямителе также зависит от величины и характера нагрузки.

Необходимо указать, что при большой нагрузке дуга не успевает потухнуть в момент приключения новой фазы и с этого момента проис-

ходит параллельная работа, например, фазы I, II, II, III. Нагрузочный ток в этом случае протекает по всем трем фазам.

Наличие отключений вызывает, как и в однофазном выпрямителе, дуги размыкания и перенапряжения. На осциллограмме фиг. 27 даны совмещенные кривые линейного напряжения при холостом ходе и при активной нагрузке в 500 ма; перенапряжение достигает 13%. Анализ ряда осциллограмм [33], снятых при отключенном успокоительном сопротивлении, показал, что перенапряжения при активной нагрузке лежат в пределах 10—15%, при смешанной ($C = 0,018$ мкф) величина перенапряжений меняется от 42% при $I_g = 240$ ма до 18% при $I_g = 500$ ма.



Фиг. 28. Осциллограммы выпрямленного тока (I_g), тока в балластном сопротивлении (I_ϕ), тока в фазной обмотке трансформатора (I_ϕ) и линейных напряжений при холостом ходе (U_{20}) и активной нагрузке трехфазного выпрямителя (U_2).

Для уменьшения перенапряжений служит успокоительное сопротивление, подключаемое к фазной обмотке трансформатора после отключения от нее конца цепи нагрузки [34]. Включение успокоительного сопротивления не прекращает, однако, горения дуги размыкания.

Анализ осциллограмм напряжений показал, что наличие успокоительного сопротивления уничтожает перенапряжения при чисто активной нагрузке, причем величина сопротивления почти не имеет значения.

На фиг. 28 приведены осциллограммы выпрямленного тока, тока в фазной обмотке трансформатора и в успокоительном сопротивлении, а также кривые линейных напряжений; осциллограмма показывает отсутствие перенапряжений.

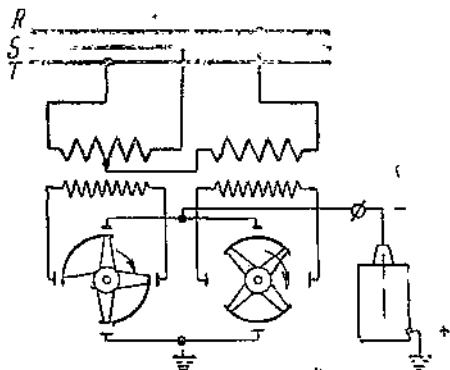
При смешанной нагрузке включение успокоительного сопротивления мало уменьшает величину перенапряжений, так, например, при нагрузке 340 ма перенапряжение снижается с 27 до 20%, при 500 ма—с 18 до 13%.

На работу успокоительного сопротивления большое влияние оказывают воздушные зазоры и момент включения [38]. Подобрать успокоительное сопротивление крайне сложно и возможно только в лабораторных условиях, и то только для определенной нагрузки. В рабочих условиях нагрузка и зазоры меняются и роль успокоительного сопротивления практически сводится к нулю. Опыты автора на Нижне-Салдинском заводе с трехфазным выпрямителем фирмы Лурги показали, что через балластное сопротивление ток вовсе не протекает и его отключение не отражается на работе выпрямителя.

Таким образом можно прийти к выводу, что трехфазному высоковольтному механическому выпрямителю свойственны те же недостатки, что и однофазному. Причиной является отсутствие в обоих выпрямителях непрерывного непосредственного приключения цепи нагрузки ко вторичной обмотке трансформатора.

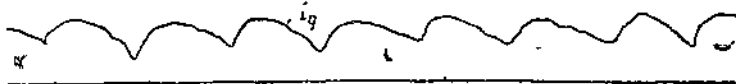
5. ДВУХФАЗНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ СБ (СИСТЕМА АВТОРА)

Трехфазно-двухфазный механический выпрямитель СБ предназначен для фильтров с проводящей пылью. Основным свойством выпрямителя СБ является непрерывное приключение цепи фильтра к обмоткам транс-



Фиг. 29. Принципиальная схема устройства трехфазно-двухфазного высоковольтного механического выпрямителя СБ (система автора).

форматора, благодаря чему обеспечивается почти безыскровая коммутация, чего нет в других системах, в частности, в трехфазном выпрямителе.



Фиг. 30. Осциллограмма тока I_g при нагрузке выпрямителя СБ на активное сопротивление ($U_g = 90$ кв, $I_g = 500$ ма).

Выпрямитель СБ имеет следующую конструкцию: на валу реактивного двигателя установлены две пары дугообразных контактов. Последние расположены по разные стороны статора двигателя и взаимно сдвинуты на 45° . Контакты электрически изолированы от вала — они прикреплены к лопастям из дерева. Щетки прикреплены с каждой стороны

к головкам четырех изоляторов. Последние сдвинуты относительно друг друга на 90° и привинчены к стержням, приваренным к бандажу. Бандаж охватывает статор двигателя и жестко связан с основанием. Статор двигателя можно поворачивать вокруг оси с помощью особого штурвала. Двухфазное высокое напряжение подводится соответственно к щеткам боковых изоляторов; выпрямленное напряжение получается на щетках верхнего и нижнего изоляторов.

Трехфазное напряжение низковольтной сети трансформируется в двухфазное высокое напряжение [37], например, при помощи группы Скотта (фиг. 29). Цель нагрузки (фильтр) приключена одновременно к двум коммутирующим устройствам, порознь выпрямляющим фазные напряжения. Коммутирующее устройство вращается двигателем, делающим 1 500 об/мин.

На фиг. 30 приведена осциллограмма выпрямленного тока при чисто активной нагрузке.

Подробное описание выпрямителя СБ и данные его исследований опубликованы в периодической печати [35], [36] и помещены в диссертации автора [12]. Конструкция выпрямителя СБ несравненно проще, чем трехфазного, и весь агрегат требует примерно в два раза меньше площади.

Выпрямитель можно устанавливать непосредственно на баке трансформатора. Размеры выпрямителя для напряжения 90 кв и тока до 700 ма: высота 880 мм, длина 600 мм, ширина 720 мм, диаметр крестов 530 мм.

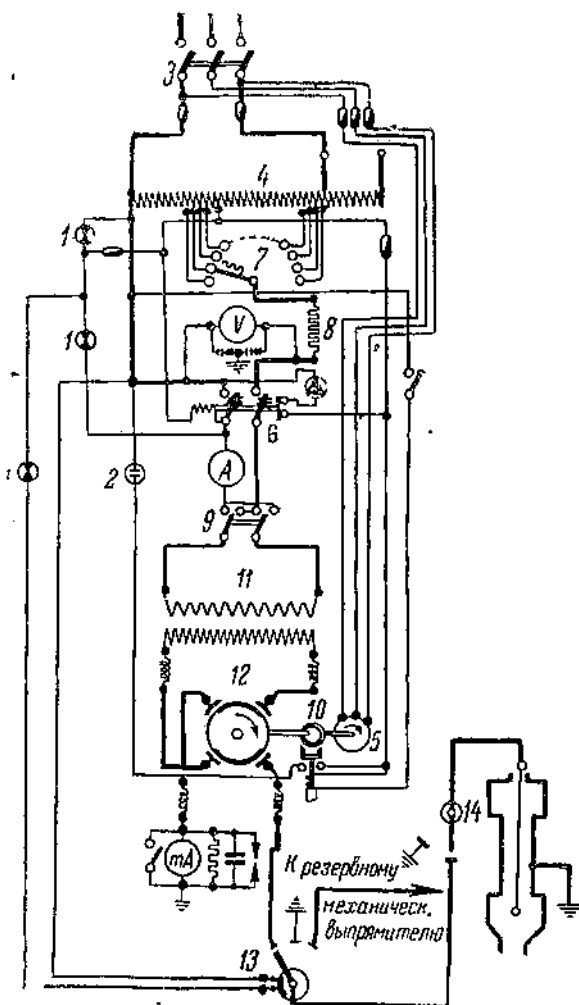
Глава 8

КОММУТАЦИОННАЯ, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ, ЗАЩИТНАЯ И СПЕЦИАЛЬНАЯ АППАРАТУРА АГРЕГАТОВ

1. АГРЕГАТЫ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ

Вся низковольтная аппаратура, измерительные приборы и указатель полярности монтируются вместе. В американских установках часто применяется пульт управления, а в советских установках—сборный щит следующих размеров: высота 2 000 мм, ширина 500 мм и длина 1 000 мм. В распределительном щите установлен также и регулировочный автотрансформатор с коммутатором. Выше указывалось, что автотрансформатор не следует вообще применять, а лучше пользоваться регулируемым трансформатором. Коммутатор для последнего должен быть установлен на стенке его бака; на пульт управления следует вывести только штурвал штанги коммутатора. Щиты советских агрегатов очень громоздки; мы полагаем, что целесообразно изготовлять пульта, которые при отсутствии автотрансформатора будут компактными. Пульт ценен еще тем, что вся аппаратура в нем закрыта и менее загрязняется, что особенно важно при расположении подстанций в непосредственной близости от производственных цехов химических заводов или от котельных. Ниже дается описание распределительного щита агрегата, ТУ-200 Московского рентгеновского завода. На фиг. 31 изображена принципиальная схема соединений агрегата.

В щите расположен главный трехполюсный рубильник 3, автотрансформатор 4, максимально-нулевой автомат 6 в цепи высоковольтного



Фиг. 31. Принципиальная схема соединений однофазного трансформаторно-выпрямительного агрегата ТУ-335 Московского рентгеновского завода ($U_g = 90$ кв, $I_g = 200$ ма).

трансформатора, коммутатор 7, токоограничивающее активное сопротивление 8, амперметр и переключатель 9 в цепи трансформатора, вольтметр на зажимах его цепи, указатель полярности—неоновая лампа 2, три сигнальные лампы 1—зеленая, красная и белая, миллиамперметр и замыкатель, шунтирующий его цепь, кнопка для указателя полярности, конденсаторы, шунтирующие вольтметр и миллиамперметр¹, и, наконец, плавкие предохранители [38], [39].

Главный рубильник включает одновременно автотрансформатор 4 и реактивный синхронный двигатель 5. Трансформатор включается вручную максимально-нулевым автоматом после установления должной полярности. Всю конструкцию устройства для определения полярности следует признать мало удачной, так как отдельные ее элементы быстро выходят из строя.

В советских агрегатах желателен автоматический пуск с правильной полярностью цепи выпрямленного высокого напряжения.

Интересен вопрос о токоограничивающем сопротивлении². Были попытки заменить его дросселем. Мы считаем это неверным — активное сопротивление полезно и тем, что уменьшает перенапряжения, возникающие при коммутации выпрямителя. Эту роль не может играть дроссель. Следует оставить активное сопротивление для установок с механическим выпрямителем; отметим еще, что при дросселе с увеличением нагрузки наблюдается разрегулировка креста. Дроссели должны применяться для агрегатов с кенотронами. В американских установках они не используются.

В советских установках для фильтров применяются еще высоковольтные переключатели 13 и разъединители 14 (фиг. 31). Переключатель 13 служит для переключения провода, идущего к фильтру, к резервному агрегату, или для полного отключения. Переключатель (разъединитель) 14 предназначен для отключения и заземления фильтра. Переключатели имеют поворотный изолятор, несущий контактный нож и ручной привод. Конструкции переключателей и разъединителей следует усилить.

Ток высокого напряжения подводится к фильтру одножильным кабелем или шпной, проложенной в трубопроводе с диаметром 400 мм. Кабель обладает несомненными преимуществами для установок с кенотронами. В установках с выпрямителями собственная емкость кабеля затрудняет возможность регулирования выпрямителя — уменьшаются пределы регулирования и резко сказываются перенапряжения.

При установке механических выпрямителей необходимо принять специальные меры по уменьшению создаваемых ими помех, влияющих на радиоприем. Лучшее средство — экранирование помещения подстанции заземленной сеткой. Последняя устанавливается под штукатуркой. Отдельные фирмы, например, Сименс-Лурги, применяют специальные радиодроссели, включаемые в провод, идущий к фильтру. Указанные дроссели мало эффективны. Целесообразен дроссель в цепи, идущей к осадительному электроду. Его следует помещать в цепь, связывающей щетку выпрямителя с миллиамперметром. Рентгеновский завод правильно распологал радиодроссель в баке высоковольтного трансформатора. Отметим, что нужна экспериментальная работа по определению нужной величины индуктивности, которая у современных дросселей недостаточно велика.

¹ Конденсаторы служат для прохождения токов высокой частоты, возникающих при электрических дугах размыкания в механическом выпрямителе. Емкость конденсатора 0,5 мкф.

² В ште ТУ-200 сопротивление состоит из 15 константовых спиралей; общее сопротивление резистора 0,33 ом при 50а.

2. АГРЕГАТЫ С КЕНОТРОНАМИ

В Америке сконструирован пульт для агрегата с кенотронами, предназначенный для очистки дымовых газов и работающий при напряжении 30 кв. Для выпрямления служат два кенотрона. Средняя точка вторичной обмотки трансформатора выведена; имеется, следовательно, двухполуволновая схема с плохим использованием меди трансформатора, как и в трансформаторах для ртутных выпрямителей. Пульт снабжен кнопкой с контактором для включения цепи накала кенотронов и кнопкой для включения анодного главного контактора. Цепь этого контактора управляется главным реле и промежуточным реле времени. Последнее нужно для того, чтобы анодный контактор был включен лишь после нагрева катодов кенотронов. Для отключения аппарата служат особая кнопка и два защитных реле. По новейшей схеме агрегат не имеет регулирования вторичного напряжения. Для ограничения тока короткого замыкания установлен дроссель. Для защиты агрегата и, в частности, кенотронов от повреждения при пробое в фильтре служит система ламповых реле; использованы элементы электронных автоматических схем. Эти реле при пробое в фильтре отключают агрегат, несколько раз повторно включают его и совсем отключают лишь при установившемся пробое. Это сделано для того, чтобы агрегат не отключался при мгновенных, быстро прекращающихся пробоях. Ввиду хрупкости кенотронов простого реле с выдержкой времени недостаточно.

Нужно признать, что установки с кенотронами действительно очень сложны и высказанное выше мнение о необходимости изготовления советских агрегатов с механическими выпрямителями вполне обосновано.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Б. Л. Шнеерсон. Электрическая очистка газов в химической промышленности. Москва, 1936.
2. И. С. Попов. Электрическая очистка газов в цементной промышленности. Москва, 1941.
3. Н. Н. Егоров. Очистка отходящих газов в цветной металлургии. Сборник: "Труды совещания по очистке промышленных газов". Москва, 1941.
4. Б. Л. Шнеерсон и Н. Н. Егоров. Электрическая очистка газов. Москва, 1933.
5. Б. Л. Шнеерсон. Электрический, химический, механический методы очистки промышленных газов. Сборник: "Труды совещания по очистке промышленных газов". Москва, 1941.
6. R. Heinrich. Der heutige Stand der Gasreinigung, ETZ, 1939, № 1, 2.
7. Л. П. Едронкин. Газоочистка в доменном производстве. Москва, 1935.
8. Трест Газоочистка. Каталог: "Газоочистительное оборудование", Стандартгиз, 1943.
9. С. П. Жебровский. Физические основы электрической очистки газов. Сборник: "Труды совещания по очистке промышленных газов". Москва, 1941.
10. С. П. Жебровский. Электрофильтры и их сепарационные свойства. Докторская диссертация, МЭИ им. Молотова. Москва, 1944.
11. A. Strigel. Über neuere Messungen an Elektrofiltern, Siemens-Zeitschrift, 1930, № 4—5.
12. А. М. Бамдас. Трансформаторно-выпрямительные агрегаты для электрофильтров. Докторская диссертация, МЭИ им. Молотова. Москва, 1938.
13. А. М. Бамдас. Схемы регулируемых трансформаторов. Журнал "Электричество", 1944, № 1.
14. А. М. Бамдас. Выбор системы регулирования напряжения для аппаратов. Журнал "Электричество", 1944, № 4.
15. А. М. Бамдас. Трансформаторно-выпрямительные агрегаты для электрической очистки газов. Журнал "Электричество", 1945, № 3.
16. В. В. Ясинский. Работа коммутаторов переменного тока. Журнал "Достижения в области рентгентехники", 1933, № 1.
17. В. В. Ясинский. Новая схема регулировочных автотрансформаторов. Журнал "Успехи рентгентехники", 1935, № 1.
18. E. Norris. The Moving Coil Voltage Regulator, JEE, 1938.
19. А. М. Бамдас и В. В. Беляев. Трансформаторы системы Е. Норриса для плавного регулирования напряжения. Журнал "Успехи рентгентехники", 1933, № 1.
20. А. М. Бамдас и В. В. Беляев. Анализ режима холостого хода трансформатора с подвижной короткозамкнутой обмоткой. Журнал "Электричество", 1940, № 9.

21. А. М. Бамдас. U-образное соединение трансформаторов. Журнал "Электричество", 1935, № 15.
22. А. М. Бамдас и Б. В. Беляев. Влияние числа разрывов на дугу размыкания в механическом выпрямителе. Журнал "Успехи рентгенотехники", 1936, № 1.
23. В. В. Ясинский. Падение напряжения в механическом выпрямителе. Журнал "Достижения в области рентгенотехники", 1931, № 3.
24. С. Е. Ростковская. Перенапряжения при работе механических выпрямителей на электрофильтры. Журнал "Успехи рентгенотехники", 1937, № 1.
25. С. Е. Ростковская. Работа механических выпрямителей при больших нагрузках. Журнал "Достижения в области рентгенотехники", 1933, № 1.
26. А. М. Бамдас и Г. В. Голодолинский. Расчет коммутирующих устройств механических выпрямителей. Журнал "Успехи рентгенотехники", 1937, № 1.
27. Е. М. Гольдовский. Реактивные двигатели для звукового кино. Москва, 1935.
28. А. М. Бамдас и Е. М. Гольдовский. Конденсаторный реактивный двигатель. Журнал "Электричество", 1936, № 18.
29. В. Н. Ужов и Ю. А. Скорецкий. Исследование работы полуволнового трансформаторно-выпрямительного агрегата. Технический отчет № 302 НИОГАЗ, Москва, 1939.
30. Н. Н. Елисеев. Испытание электрофильтров Чимкентского завода. Технический отчет № 379 НИОГАЗ, Москва.
31. Ю. А. Скорецкий и И. Н. Востоков. Полуволновые агрегаты. Технический отчет № 458 НИОГАЗ, Москва, 1944.
32. W. Deutsch. Die Erzeugung von hochgespanntem Gleichstrom aus Drehstrom. ETZ, 1930, № 43.
33. А. М. Бамдас и С. Е. Ростковская. Электрические дуги размыкания и перенапряжения при работе механического выпрямителя системы В. Дейча. Отчет МЭИ им. Молотова, Москва, 1944.
34. П. П. Сахаров. Расчет балластного сопротивления для трехфазного механического выпрямителя. Журнал "Достижения в области рентгенотехники", 1932, № 9.
35. А. М. Бамдас. Трехфазно-двухфазный механический выпрямитель СБ. Журнал "Успехи рентгенотехники", 1936, № 2.
36. А. М. Бамдас. Мощный механический выпрямитель СБ. Журнал "Электричество", 1936, № 12.
37. А. М. Бамдас и Б. В. Беляев. Трансформация напряжения и числа фаз при питании двухфазного выпрямителя СБ от трехфазной сети. Журнал "Известия электропромышленности слабого тока", 1937, № 1.
38. Московский рентгеновский завод. Описание № ТУО 21. Высоковольтный агрегат электрофильтра для очистки газов. Москва, 1940.
39. В. Н. Ужов (под редакцией Н. Н. Егорова). Обслуживание электрофильтров. Москва, 1944.

БИБЛИОГРАФИЯ

УЧЕНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ

БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ

БИБЛИОТЕКА БССР

40935

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Электрическая очистка газов и ее значение	3
Глава 2. Устройство и принцип действия электрофильтров	4
Глава 3. Необходимая форма кривой напряжения для питания электрофильтров	8
Глава 4. Номинальные данные трансформаторно-выпрямительных агрегатов	8
Глава 5. Специальные трансформаторы и автотрансформаторы для электрофильтров	9
1. Высоковольтные трансформаторы	9
2. Высоковольтный регулируемый трансформатор с добавочной обмоткой	13
3. Сравнение потерь при различных системах регулирования	15
4. Трансформатор с добавочной обмоткой и с половинным числом отпаек (система автора)	17
5. Универсальный высоковольтный трансформатор с плавным регулированием напряжения для лабораторных установок (система автора)	18
6. Ступенчатые регулировочные автотрансформаторы и коммутаторы для электрофильтров	19
7. Автотрансформаторы системы Норриса	20
8. Автотрансформатор с передвижным сердечником	24
9. Многофазные трансформаторы и автотрансформаторы для электрофильтров	24
10. Трансформаторы для воздушных фильтров	25
Глава 6. Высоковольтные выпрямители для электрофильтров (сравнение различных типов)	25
Глава 7. Высоковольтные механические выпрямители для электрофильтров	26
1. Однофазные высоковольтные механические выпрямители	27
2. Синхронный реактивный двигатель для механических выпрямителей	30
3. Полуволновые высоковольтные механические выпрямители	32
4. Трехфазный высоковольтный механический выпрямитель	33
5. Двухфазный высоковольтный механический выпрямитель СБ (система автора)	36
Глава 8. Коммутационная, измерительная, защитная и специальная аппаратура агрегатов	37
1. Агрегаты с механическими выпрямителями	37
2. Агрегаты с искотронами	40
Библиография	41

