

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

1948

5

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

5
1948
МАЙ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

СОДЕРЖАНИЕ

Развитие дросселей насыщения как элементов систем автоматического регулирования и управления	4
Л. А. Бессонов — Применение дросселей насыщения в современной технике	7
С. М. Осовец — Проектирование и расчет дросселей насыщения	22
И. Л. Каганов — Бесконтактный быстродействующий регулятор тока	33
В. П. Савельев — Дугогасящие свойства современных вентильных разрядников	40
Р. Д. Лейтес — Нестационарные процессы в цепи с вентильным элементом и смешанной нагрузкой	47
В. А. Веников — Упрощенный расчет динамической устойчивости электрических систем	53
Д. В. Разевиг — Затухание волн в кабелях	58
Н. А. Сазонов — Комплексное применение электрической энергии в сельскохозяйственном производстве	62
Авторефераты	
Е. К. Мезин — Самовозбуждающаяся электромагнитная синхронная муфта	66
В. В. Зиверт — Условия выполнения двухслойной обмотки с неравноитковыми секциями	67
Л. В. Карнюшин и П. К. Куликовский — Ламповый автоматический регулятор для машин с широкими пределами регулирования	71
С. Н. Ляндрес — Оптимальный режим загрузки ртутно-выпрямительных агрегатов тяговых подстанций	73
И. Д. Школин — Индукционный зажигатель ртутных выпрямителей	76
Дискуссии	
К статье А. М. Залесского „Профилактические испытания изоляции электрических машин“	79
Обзоры и рефераты	
Б. И. Филипович — Современные приборы для измерения слабых магнитных полей	85
Хроника	
О проведении 50-летнего юбилея Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина)	88
В НТО Московского энергетического института им. Молотова	88
Конференция МОНИТОЭ	89
Фархадская гидроэлектростанция	90
О награждении завода „Электросила“ и работников завода, управления „Днепрострой“ и работников Днепростроя, треста „Храмгэсстрой“ и работников Храмгэсстроя	90
В. К. Попов — некролог	91
Заметки и письма	92
Библиография	
А. Т. Голован, Н. Л. Каганов, Р. Ю. Малая, А. Д. Свенчанский и А. А. Тайц — Книга „Экономия электроэнергии в промышленности“	94

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редантор), академик **А. И. Берг**, доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Буткевич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Глазунов**, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик **В. Ф. Миткевич**, канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

Секретарь инж. **Я. А. Климовицкий**

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80.
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.
Адрес для телеграмм: Москва Электричество

Ленинградскому Электротехническому институту им. Ульянова (Ленина)

Редакция журнала «Электричество» горячо приветствует и поздравляет дирекцию, профессорско-преподавательский состав и студентов Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина) в связи с 50-летием со дня основания института.

Ленинградский электротехнический институт является колыбелью русской высшей электротехнической школы. С его именем и с его развитием тесно связаны многие этапы славной истории электротехники и электрификации нашей страны.

Широко известны выдающиеся заслуги ЛЭТИ в развитии электротехники и в подготовке для социалистического народного хозяйства высококвалифицированных кадров инженеров-электриков. Труды научных деятелей ЛЭТИ нашли успешное применение в электрохозяйстве и электропромышленности СССР.

Научные работники ЛЭТИ на протяжении многих лет принимают активное участие в журнале «Электричество». Немалое количество работ, выполненных на кафедрах и в лабораториях ЛЭТИ, опубликовано в журнале «Электричество».

Редакция желает руководству и всему коллективу Ленинградского электротехнического института новых успехов в дальнейшей научной и учебной работе на благо нашей великой Родины.

Редакция журнала «Электричество»



Развитие дросселей насыщения как элементов систем автоматического регулирования и управления

Около полу столетия известна возможность изменения индуктивности катушки, по которой протекает переменный ток, наложением на переменный магнитный поток дополнительного постоянного потока. Однако, использование этой возможности как принципа, положенного в основу нового аппарата, известного под названием «дроссель насыщения», стало широко осуществляться лишь в последние 10—15 лет. Это может быть объяснено особенностями развития автоматического управления и регулирования, с которыми тесно связано применение дросселей насыщения.

Как известно, первые регуляторы представляли собой механические конструкции, служащие для регулирования скорости паровых машин. Электрические регуляторы создавались под сильным влиянием механических, достигших ко времени появления электрических регуляторов довольно высокого конструктивного совершенства, и выполнялись, как электромеханические устройства. При этом для решения почти каждого класса задач приходилось заново конструировать свой тип регулятора.

Проблемы автоматического управления решались на основе использования как основного элемента системы управления реле и контактора.

В двадцатых годах были разработаны серии реле и контакторов, допускающие очень большое число конструктивных и схемных форм выполнения, которые позволяли решать задачи автоматического управления путем комбинирования одинаковых стандартных элементов. Основным недостатком таких систем управления явился релейный характер их действия. Между тем, большинство известных в это время как электрических, так и неэлектрических систем регулирования представляло собой системы непрерывного действия, значительно более совершенные, чем релейные системы.

Естественно, возникло стремление создать такие системы, которые допускали бы решение задач регулирования и управления на основе использования ряда стандартных элементов и в то же время представляли бы собой системы непрерывного действия. Результатом этих стремлений явились создание так называемых электромеханических усилителей (амплидин, рототрол,

регулекс) и широкое использование дросселей насыщения. Комбинируя такие вновь появившиеся машины и аппараты с уже известными и широко применяющимися элементами электрических схем (конденсаторы, сухие выпрямители, электронные лампы и т. д.), можно создать системы непрерывного регулирования и управления, отвечающие разнообразным требованиям, предъявляемым к ним в настоящее время.

Роль дросселей насыщения в современной электротехнике весьма важна. В этом нетрудно убедиться, перечислив основные области их применения.

Регулирование напряжения ряда потребителей электрической энергии целесообразно осуществлять с помощью дросселей насыщения. К таким потребителям относятся лабораторные установки, где для всевозможных испытаний требуется стабилизация напряжения постоянного и переменного тока и регулирование его в широких пределах; установки для контроля качества продукции на заводах, где по условиям технологии испытаний необходим источник стабильного напряжения.

Особенно эффективно применение дросселей насыщения для регулирования напряжения потребителей, обладающих большой постоянной времени. К числу таких потребителей относятся электрические печи для отжига, закалки, поверхностной цементации и других целей металлообработки, в металлургии и в химической промышленности, осветительные установки театральных сцен, где требуется плавное дистанционное регулирование напряжения большого числа объектов небольшой мощности; темнители зрительных зал театров и кино; накал газотронов и мощных электронных ламп высокочастотных генераторов для поверхностной закалки и генераторов радиостанций и т. п.

Большое распространение получили в последнее время дроссели насыщения в схемах для зарядки аккумуляторных батарей. Соответствующие схемы включения позволяют полностью автоматизировать процесс зарядки при любых режимах работы аккумуляторных батарей. Созданы также совершенные выпрямительные устройства, для питания гальванических ванн, управляемые дросселями насыщения.

Менее широка область применения дросселей насыщения для регулирования и управления электродвигателями. Однако, и здесь можно указать на ряд успешно решаемых ими технических задач.

Включение в статор синхронного двигателя дросселей насыщения и питание их подмагничивающих обмоток по специальной схеме позволяют осуществлять автоматический пуск двигателя по значительно упрощенной схеме без автотрансформаторов и дополнительных выключателей. Если, кроме того, после пуска двигателя оставлять дроссель насыщения включенным, то можно использовать его для защиты установки от коротких замыканий. При этом возможно совсем отказаться от выключателей, заменив их разъединителями мощности.

В некоторых случаях дроссели насыщения применяются для пуска, реверса и регулирования скорости вращения асинхронных двигателей. Дроссели насыщения получили распространение, главным образом, при регулировании асинхронных двигателей малой мощности. Если момент нагрузки достаточно быстро падает при уменьшении скорости вращения, то использование дросселей насыщения оказывается целесообразным и для асинхронных двигателей большой мощности.

Для следящих приводов промышленной частоты использование дросселей насыщения, вследствие их сравнительно большой постоянной времени, оказалось нерациональным. Однако, при частоте выше 50 Hz дроссели насыщения нашли применение и в этой области электропривода.

В дуговых электропечах, при электросварке и в дуговых кинопроекторных установках дроссели насыщения с успехом используются для стабилизации горения дуги.

Выше были перечислены области применения дросселей насыщения как силовых элементов систем автоматического управления и регулирования. Еще более широкое применение нашли дроссели насыщения как магнитные усилители. Особенно большое распространение получили магнитные усилители в схемах автоматического регулирования. При использовании специальных сплавов абсолютное значение мощности, потребляемой подмагничивающей обмоткой магнитных усилителей, может быть доведено до долей милливатта, и во многих случаях магнитные усилители успешно конкурируют с электронными.

Малая мощность подмагничивающего постоянного тока позволяет применять в магнитных усилителях несколько подмагничивающих обмоток, выполняющих самые различные функции. Эти обмотки можно использовать для сравнения регулируемой величины с эталоном, для введения обратной связи, получения требуемой кривой переходного процесса, для обеспечения устойчивости и т. д.

Регуляторы, использующие магнитные усилители, успешно конкурируют и постепенно вытесняют электронные и ионные регуляторы синхронных генераторов. Синхронные генераторы с

самовозбуждением имеют силовой дроссель насыщения, контролирующий ток возбуждения, выпрямленный сухими выпрямителями, и магнитный усилитель, используемый как регулятор. В системе возбуждения синхронных генераторов средней и большой мощности с возбудителями силовые дроссели насыщения контролируют выпрямляемый переменный ток, подпитывающий возбуждение возбудителя и получаемый в схеме регулирования от трансформатора напряжения или от трансформатора тока в схеме компаундирования. Магнитные усилители в этих случаях также используются как регуляторы.

В схемах управления ионными приборами дроссели насыщения применяются для сдвига фазы сеточного напряжения.

Кроме этого далеко не полного перечня применений дросселей насыщения в системах автоматического управления и регулирования следует отметить использование дросселей насыщения и в других областях электротехники: например, как умножителей частоты, для измерения больших постоянных токов, в схемах телеизмерения, для ограничения токов короткого замыкания сети, снятия пиков нагрузки и т. д. Дроссель насыщения можно использовать для создания таких аппаратов, как, например, мигающего источника света, бесконтактных защитных реле и т. д.

Основные достоинства дросселей насыщения заключаются в следующем:

1. Управление и регулирование дросселями насыщения совершается плавно.

2. Дроссель насыщения не имеет подвижных частей и с конструктивной стороны предельно прост, что выгодно отличает его от электромеханического усилителя, который представляет собой машину постоянного тока с коллектором и щетками.

3. Дроссель насыщения имеет высокий к. п. д., сравнимый с к. п. д. трансформатора, равному по мощности регулируемому объекту.

4. Дроссели насыщения могут быть осуществлены для очень широкой шкалы мощностей и системы регулирования, и управления с использованием их могут применяться для объектов с мощностями от долей ватта до сотен киловатт.

Нельзя умолчать и о тех недостатках, которые присущи дросселям насыщения.

Основным недостатком их с точки зрения регулирования является большая постоянная времени. Этот недостаток можно устранить применением повышенной частоты, что, конечно, не всегда осуществимо.

Применение дросселей насыщения становится нерациональным, если при получении регулируемого напряжения постоянного тока требуется изменять его полярность, так как для этого необходимо осуществлять включение дросселей насыщения по сложной схеме с низким к. п. д., в то время как при использовании электромеханического усилителя требуется только изменить направление тока в его управляющей обмотке.

Включение дросселей насыщения приводит к искажению формы кривой тока и напряжения и

к значительному уменьшению коэффициента мощности. Это обстоятельство, несущественное в магнитных усилителях, может играть решающую роль в силовых цепях. В силовых цепях применение дросселей насыщения становится нецелесообразным, если возможный сброс нагрузки регулируемого объекта очень велик, и мощность нагрузки становится мала по сравнению с номинальной мощностью дросселя. Ток холостого хода дросселей насыщения, т. е. ток его при отсутствии подмагничивания, составляет обычно 7—12% от номинального значения. Это обстоятельство в некоторых схемах снижает кратность регулирования по току или по напряжению.

Перечисленные недостатки ограничивают иногда применение дросселей насыщения.

В развитии дросселей насыщения значительную роль сыграли советские электротехники. Следует прежде всего, отметить, что впервые в 1914 г. Н. Д. Папалекси применил дроссель насыщения для регулирования напряжения. Начиная с 1939—1940 гг. появляется большое количество советских работ, посвященных вопросам, связанным с освоением дросселей насыщения в СССР. В 1940 г. Н. Н. Михайловым было разработано устройство для автоматической зарядки аккумуляторных батарей. В 1939 г. Д. И. Марьяновский разработал систему регулирования лампового осветительного блока, а в 1945 г. устройство для разогрева и регулирования температуры молибденовой печи. Г. Р. Герценберг в 1939 г. создал многокаскадный усилитель и осуществил следящую систему с дросселями насыщения. Кроме того, им же было разработано фотореле с силовым контактором, контролируемым дросселем насыщения, подмагничивающая обмотка которого питалась от специального фотоэлемента. Н. И. Петров в 1939 г. создал регулятор напряжения синхронного генератора небольшой мощности с магнитным усилителем. А. А. Фельдбаум в 1940 г. разработал магнитный усилитель напряжения с коэффициентом усиления, равным 300.000. Л. И. Мойжес в 1939 г. сконструировал и испытал в сети высокого напряжения дроссель насыщения для ограничения токов короткого замыкания (компенсированный реактор). О. Е. Гольдин в 1941 г. разработал дроссель насыщения для стабилизации тока дуги кинопроекторной установки. И. И. Кодкинд в 1945 г. разработал устройство для компаундирования и регулирования мощного синхронного генератора с дросселем насыщения. В ВЭИ недавно разработана (С. В. Крауз) серия дросселей насыщения. Этот далеко не исчерпывающий перечень работ по освоению и внедрению дросселей насыщения следует дополнить теоретическими работами: например, работой, сделанной в 1944 г. С. М. Осовцом и др.

Дальнейшее освоение и внедрение дросселей насыщения потребует решения ряда теорети-

ческих и практических задач.

Разработка теории переходных процессов в цепях с дросселями насыщения значительно облегчила бы применение их в системах регулирования. Расчеты на нагрев дросселей насыщения, контролирующих мощности от нескольких киловатт и выше, связаны с вопросом потерь (главным образом, на гистерезис) в трансформаторной стали при подмагничивании ее постоянным током. Разработка этого вопроса, освещенного в литературе крайне слабо, значительно облегчила бы проектирование дросселей насыщения для силовых цепей. Большой интерес представляла бы также разработка теории дросселей насыщения, соединенных последовательно с нагрузкой, содержащей кроме активного сопротивления еще индуктивность или емкость, а также дросселей насыщения в схемах регулирования и управления двигателями.

Важное значение имеет разработка методики расчета потоков рассеяния обмоток переменного тока при разных подмагничиваниях. Точное решение этой задачи вряд ли возможно, и здесь интересна была бы разработка способа приблизительной оценки величины рассеяния.

Надо подчеркнуть, что все упомянутые выше расчетные проблемы относятся к дросселям насыщения для силовых цепей, так как параметры дросселей насыщения небольшой мощности (например, применяемых в магнитных усилителях) гораздо проще подбирать экспериментально.

Проблемы материалов, изоляции, охлаждения и конструкции, возникающие при производстве и эксплуатации дросселей насыщения, те же, что и для трансформаторов соответствующей мощности. Следует отметить только, что для магнитных усилителей важно дальнейшее улучшение качества магнитных материалов, типа пермаллоя, поскольку уменьшением напряженности поля, при которой наступает насыщение, можно увеличить коэффициенты усиления магнитных усилителей и, главное, уменьшить абсолютную величину сигнала, поступающего на их выход.

Для магнитных усилителей и силовых дросселей насыщения небольшой мощности существенное значение имеют некоторые технологические проблемы, связанные со спиральными и шихтованными сердечниками, набираемыми из листов, штампованных без просечки. Так, например, необходимы разработка и освоение станков и приспособлений для наматывания катушек на собранный сердечник и вматывания ленточного сердечника в намотанную катушку.

В настоящем номере журнала «Электричество» публикуются обзорная статья Л. А. Бессонова, знакомящая читателя с современным состоянием вопроса применения дросселей насыщения и упомянутая выше работа С. М. Осовца по расчету силовых дросселей насыщения.

Применение дросселей насыщения в современной технике

Кандидат техн. наук Л. А. БЕССОНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Под дросселями и насыщения понимаются дроссели, работающие при наличии и постоянного и переменного поля. Такие дроссели в нашей литературе часто называют также дросселями с подмагничиванием; в иностранной литературе они нередко именуются трансдукторами (преобразователями энергии). Дросселям насыщения свойственны: 1) способность служить регулируемым реактивным сопротивлением без подвижных частей; 2) способность работать в качестве измерительных трансформаторов постоянного тока; 3) способность умножать частоту в четное число раз.

В статье изложены некоторые исходные положения, существенно необходимые для уяснения свойств и принципа действия дросселей насыщения, и, далее, рассмотрены конкретные применения дросселей в различных областях техники.

Некоторые исходные положения (к теории дросселей насыщения). Пусть обмотки переменного тока ω двух одинаковых дросселей (рис. 1) соединены параллельно и присоединены к косинусоидальному напряжению, а обмотки постоянного тока, которые мы в дальнейшем будем называть обмотками управления ω_y , соединены последовательно и присоединены к источнику постоянного тока через регулируемое сопротивление R . Примем, что активное сопротивление обмоток ω и рассеяние малы; тогда индукция переменного поля будет синусоидальной: $B \cdot \sin \omega t$. Предположим, что кривая намагничи-

Рассматриваются применения дросселей насыщения в качестве регулируемых реактивных сопротивлений, трансформаторов постоянного тока, умножителей частоты в четное число раз и магнитных усилителей. Даны некоторые исходные положения теории дросселей насыщения. Приводятся схемы, позволяющие получить дроссели насыщения, чувствительные к полярности тока управления. Разбирается значительное количество других схем, иллюстрирующих многообразие применения дросселей насыщения в различных областях техники.

вания представлена кривой 1 (рис. 2). Если постоянное поле отсутствует, то ток (или напряженность поля) в обоих дросселях определяется кривой 2. Пропустим теперь по обмоткам ω_y некоторый постоянный ток.

Допустим, что в первый полупериод постоянного и переменное поле в правом дросселе совпадают по направлению, а в левом направлены навстречу друг другу. Тогда напряженность поля правого дросселя в функции времени изобразится кривой 3, а левого дросселя — кривой 4. Ось времени кривых 3 и 4 проходит через значение напряженности постоянного поля; площадь, ограничиваемая кривой bcd , равна площади, ограничиваемой кривой def . Кривые 3 и 4 несимметричны относительно оси времени и потому состоят из четных и нечетных гармоник. Кривая 5, полученная сложением кривых 3 и 4, дает в некотором масштабе ток, потребляемый обоими дросселями из сети. Так как кривая 5 симметрична относительно оси времени, то потребляемый из сети ток состоит только из нечетных гармо-

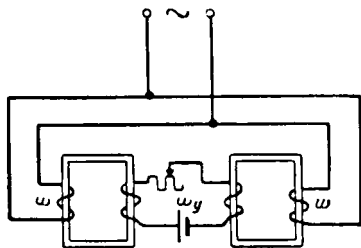


Рис. 1.

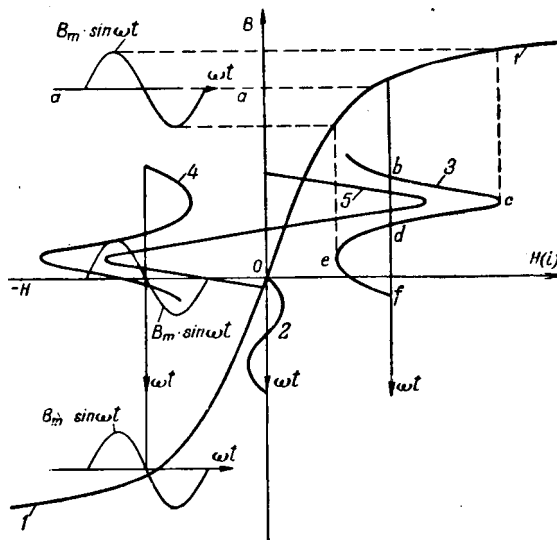


Рис. 2.

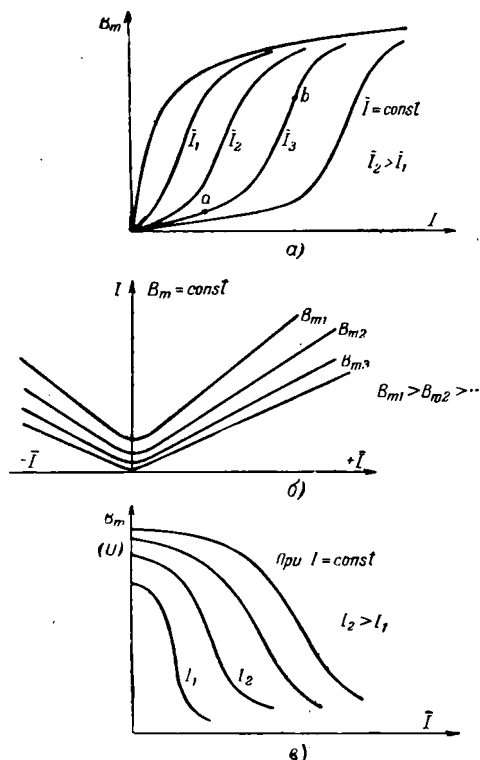


Рис. 3.

ник. Четные же гармоники в кривых 3 и 4 находятся в противофазе и потому циркулируют по обмоткам w , не выходя в сеть. Сравнив кривые 2 и 5, видим, что при том же переменном поле $B_m \sin \omega t$ величина тока, забираемого из сети, при наличии постоянного поля резко возросла. На практике широко пользуются семейством вольт-амперных характеристик, подобных изображенным на рис. 3а. По оси абсцисс откладывается переменный ток (эффективное значение) или напряженность, а по оси ординат — напряжение или индукция переменного тока. Каждая из кривых этого семейства снимается при неизменном постоянном токе \bar{I} . Верхняя кривая представляет собой вольт-амперную характеристику дросселя при отсутствии постоянного поля. Чем больше постоянное поле, тем больше соответствующая кривая отличается от кривой, снятой при $\bar{I} = 0$.

Если расчесть кривые рис. 3а прямыми $B_m = \text{const}$, можно построить кривые зависимости эффективного значения переменного тока I в функции от постоянного тока \bar{I} при $B_m = \text{const}$ (рис. 3б).

Путем сечения кривых рис. 3а прямыми $I = \text{const}$ можно получить семейство кривых $B_m = f(\bar{I})$ при различных значениях $I = \text{const}$ (рис. 3в).

Из рис. 3б следует, что при неизменном напряжении переменного тока (при $B_m = \text{const}$) мерой постоянного тока может служить величина переменного тока, забираемого из сети. Другими словами, рис. 3б иллюстрирует возможность применения дросселей насыщения в качестве аппаратов, позволяющих измерять величину постоянного тока. Из рис. 3в следует, что, изменяя постоянное поле, можно изменять вели-

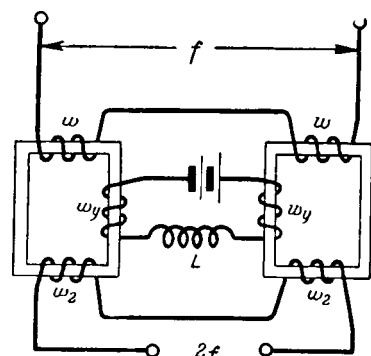


Рис. 4а.

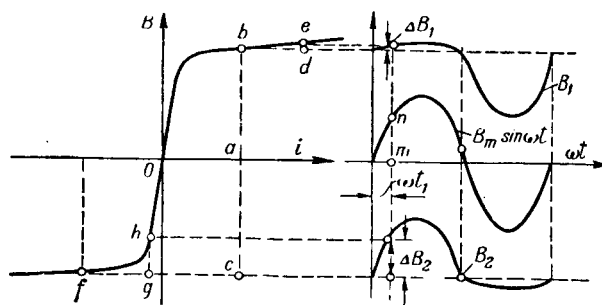


Рис. 4б.

чину реактивного сопротивления дросселя насыщения. Свойство дросселей насыщения изменять свое реактивное сопротивление в зависимости от величины постоянного тока, протекающего по обмоткам w , широко используется во всевозможных регулирующих устройствах. В каждой из обмоток w схемы рис. 1 переменный ток наводит э. д. с., равную произведению числа витков на э. д. с. одного витка. Электродвижущие силы, наведенные в двух обмотках w , направлены навстречу друг другу, и потому переменный ток по цепи обмоток w не проходит. Если объединить два смежных стержня двух дросселей рис. 1, то получится Ш-образный дроссель.

Если обмотки переменного тока расположить на крайних стержнях Ш-образного дросселя и соединить попрежнему параллельно, а обмотку w — на среднем, то переменный поток не будет заходить в средний стержень, и потому в обмотке w не наведется переменной э. д. с.

Свойство дросселя насыщения умножать частоту в четное число раз поясняется рис. 4а, б. На рис. 4а изображены два дросселя, обмотки переменного тока которых соединены последовательно, а в цепь обмоток постоянного тока w включена значительная индуктивность, препятствующая прохождению четных гармоник тока. На дросселях есть еще обмотки w_2 , соединенные последовательно. Они являются обмотками удвоенной частоты. Допустим, что напряжение сети косинусоидально, тогда сумма мгновенных значений индукций переменного поля в обоих дросселях будет синусоидальна, но индукция переменного поля в каждом из дросселей не синусоидальна.

идальна. Работу такой схемы поясняет рис. 4б. Пусть постоянная составляющая индукции и равна отрезку $ab=ac$. Мгновенные значения индукции представлены кривыми B_1 и B_2 ; эти кривые построены, исходя из того, что сумма B_1+B_2 должна дать синусоиду, и из того, что по соответствующим обмоткам проходят одинаковые токи. Построение произведено следующим образом: через точки b и c проводим горизонтали. Произвольно задаемся некоторым током, например bd (и соответственно fg) и сносим точки d и g на кривую намагничивания; получаем точки e и h . Отрезок ed равен ΔB_1 , а отрезок $gh=\Delta B_2$.

Сумма $\Delta B_1+\Delta B_2$ равна мгновенному значению индукции переменного поля. Время ωt_1 , которому соответствует значение результирующей индукции переменного поля, равное $m\pi$, определяется по выражению $\omega t_1 = \arcsin \frac{m\pi}{B_m}$. Так, по точкам

можно построить часть кривых B_1 и B_2 за первую четверть периода. Кривые для второй четверти периода будут являться зеркальным отражением кривых первой четверти периода относительно вертикали. Во второй полупериод постоянное поле будет совпадать по направлению с B_1 , как в первом полупериоде, а с B_2 . Вследствие этого кривая B_1 во второй полупериод будет являться зеркальным отражением кривой B_2 за первый полупериод. Если из кривых B_1 и B_2 вычесть постоянную составляющую, то они будут сдвинуты друг относительно друга на полупериод и зеркально отражены в оси абсцисс. Подобным кривым свойственно то, что четные гармоники имеют противоположные, а нечетные — одинаковые знаки. Следовательно, э. д. с. четных частот, наведенные в обмотках w_2 четными гармониками, будут складываться, а э. д. с., наведенные нечетными гармониками потока, — вычитаться. Если к обмоткам w_2 присоединить нагрузку, то через нее потечет ток, обусловленный четными гармониками э. д. с.

Выше отмечено, что свойство дросселя насыщения изменять свое реактивное сопротивление при изменении величины постоянного поля широко используется во всевозможных регулирующих устройствах. Условимся называть дроссели с подмагничиванием, применяемые в силовых цепях для регулирования больших мощностей, дросселями насыщения (в более узком смысле слова), а дроссели с подмагничиванием, применяемые в цепях управления, часто в совокупности с другими элементами, для усиления слабых сигналов управления, — магнитными усилителями. Такое деление в значительной мере условно и в некоторых случаях бывает затруднительно отнести дроссели с насыщением к той или другой категории, но оно весьма полезно с точки зрения рассмотрения конкретных схем применения дросселей.

Магнитные усилители. Магнитные усилители получили широкое распространение. В самом общем случае под ними понимают электромагнитные устройства, состоящие из дросселей насыщения, трансформаторов, сопротивлений, твер-

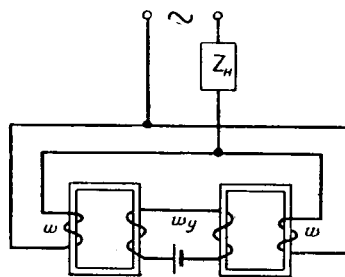


Рис. 5.

дых выпрямителей, а иногда и конденсаторов, которые позволяют усиливать слабые сигналы постоянного тока и превращать их в гораздо более мощные изменения переменного или постоянного тока. Основной составной частью магнитных усилителей являются дроссели насыщения. Магнитные усилители могут быть разделены на две большие группы: магнитные усилители мощности и магнитные усилители напряжения. От первых требуется, чтобы малые изменения мощности, затрачиваемой в цепи управления, вызывали большие изменения мощности, выделяемой в нагрузке; от вторых, — чтобы малые изменения напряжения в цепи управления вызывали большие изменения напряжения на выходе.

На рис. 5 представлена схема простейшего магнитного усилителя (ее можно рассматривать и как простейшую схему применения дросселя насыщения), отличающуюся от схемы рис. 1 только тем, что последовательно с дросселем включена нагрузка Z_n . Изменяя постоянный ток (ток управления I_y), можно регулировать величину мощности, выделяемой в нагрузке.

При $I_y=0$ через нагрузку течет ток холостого хода $I_{x.x}$. Величиной, характеризующей способность магнитного усилителя служить в качестве усилителя мощности, является коэффициент усиления по мощности $k_{y.m}$. Под ним понимают отношение приращения мощности, выделяемой в нагрузке, к мощности, затрачиваемой в обмотке (или обмотках) управления:

$$k_{y.m} = \frac{(P - P_{r.x})}{I_y^2 R_y}.$$

Для данного усилителя $k_{y.m}$ не является постоянной величиной, а зависит от R_n и I_y . Чем выше $k_{y.m}$, тем лучше устройство выполняет свое назначение усилителя. Принцип работы магнитного усилителя напряжения будет рассмотрен ниже. Магнитные усилители можно сравнить с ламповыми. Роль сетки в них играет обмотка управления. Как и в ламповой схеме, в магнитном усилителе легко осуществляется обратная связь. Преимущества лампового усилителя перед магнитным заключаются в безинерционности и в независимости от частоты. В свою очередь магнитные усилители в ряде случаев позволяют получить более высокие коэффициен-

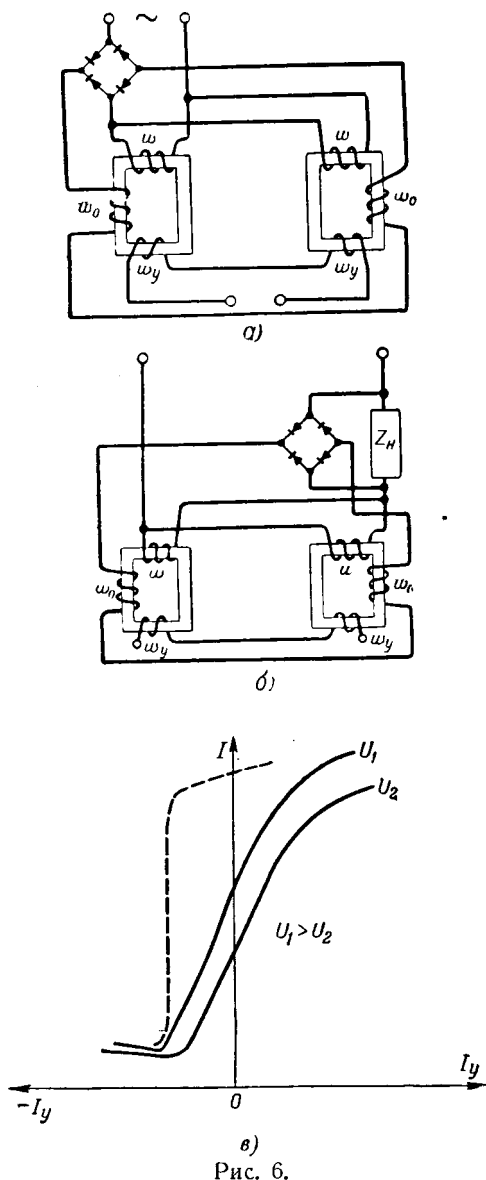


Рис. 6.

ты усиления и более высокий к. п. д., чем ламповые усилители.

Кроме того, несомненными преимуществами магнитных усилителей перед ламповыми являются: 1) возможность управления сколь угодно низким напряжением; 2) большая механическая прочность; 3) долговечность.

Способы увеличения регулирующей способности дросселей насыщения. Увеличение регулирующей способности дросселей насыщения может быть достигнуто следующими способами: 1) применением положительной обратной связи; 2) каскадным включением; 3) применением резонансного принципа.

Под обратной связью понимают добавочное подмагничивание, создаваемое выпрямленным переменным током нагрузки. Благодаря тому, что значительная часть мощности, необходимой для подмагничивания, забирается из сети переменного тока, регулирующая способность дросселя насыщения резко возрастает.

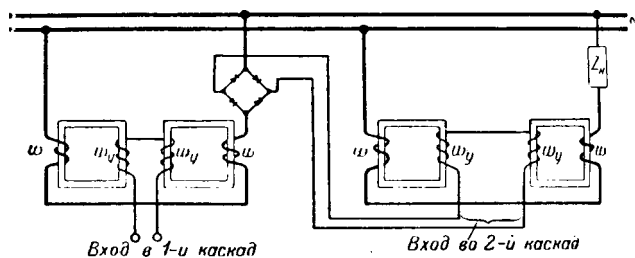


Рис. 7.

На рис. 6а дана схема последовательной, а на рис. 6б — параллельной обратной связи. В обеих схемах w_0 обозначает обмотки обратной связи. В схеме рис. 6а по обмоткам w_0 проходит выпрямленный ток, потребляемый схемой из сети. В схеме рис. 6б по обмоткам обратной связи проходит выпрямленный мостом ток, пропорциональный напряжению, приходящемуся на нагрузку. При наличии обратной связи характеристики рис. 3б деформируются: они идут более круто и становятся несимметричными относительно оси ординат (рис. 6в). Как видно из рис. 6в, ток холостого хода при наличии обратной связи при прочих равных условиях больше тока холостого хода при отсутствии обратной связи.

Под каскадным включением дросселей насыщения понимается включение, при котором ток управления поступает лишь в обмотки управления первого дросселя насыщения, а в обмотки управления каждого следующего дросселя насыщения поступает выпрямленный ток с выхода каждого предыдущего.

На рис. 7 дана схема двухкаскадного магнитного усилителя. Нагрузка включена на выходе последнего каскада.

Так как при отсутствии сигнала управления каждый следующий каскад подмагничивается выпрямленным током холостого хода предыдущего каскада, то, если не будут приняты меры к уменьшению токов холостого хода первых каскадов, через нагрузку может течь сравнительно большой ток, а это может привести к уменьшению коэффициента усиления по мощности. Увеличение регулирующей способности при применении дросселей насыщения может быть получено при использовании резонансного принципа. По аналогии с феррорезонансными схемами, позволяющими получить резкие изменения тока в цепи, например при малых изменениях напряжения на входе цепи, существует большое количество резонансных схем, в которых применяются дроссели насыщения и конденсаторы. Малое изменение подмагничивания вызывает или же сбивает резонанс, так что коэффициент усиления можно получить больший, чем в случае отсутствия конденсатора.

Схемы с дросселями насыщения, чувствительные к полярности тока управления. В ряде случаев необходимо, чтобы схемы с дросселями насыщения различали полярность воздействующего на них тока управления. Эта чувствительность к полярности может быть двух видов:

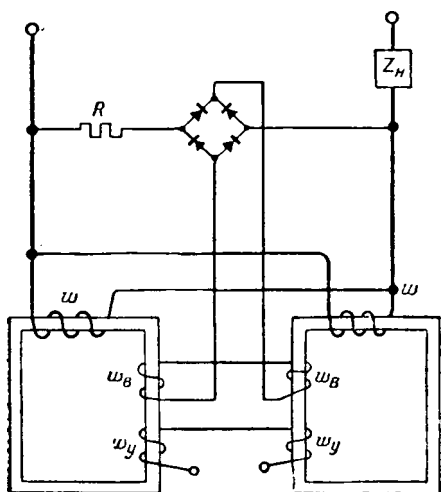


Рис. 8а.

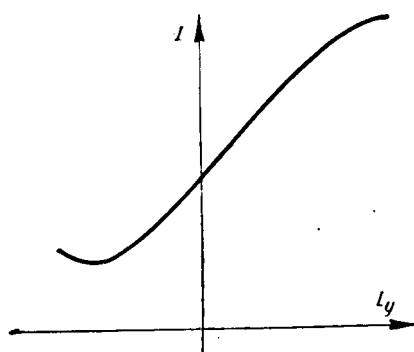


Рис. 8б.

первый вид, когда переменный ток, протекающий через дроссель насыщения, при одной полярности увеличивается, а при противоположной полярности уменьшается. Второй вид чувствительности к полярности заключается в том, что при перемене полярности тока управления изменяется фаза переменного тока на выходе схемы. Рассмотрим сначала схемы, позволяющие осуществить чувствительность к полярности первого вида. Простейшей схемой, позволяющей осуществить полярность первого вида, является схема, изображенная на рис. 8а. Особенность ее заключается в том, что независимо от тока управления дроссель неизменно подмагничен (поляризован) током, протекающим по обмотке w_B , питающейся через выпрямительный мост и сопротивление R непосредственно от сети. Благодаря этому характеристика $I=f(I_y)$ при напряжении сети $U_c=\text{const}$ примет вид, изображенный на рис. 8б. В этом случае точка холостого хода выбирается приблизительно посередине кривой $I=f(I_y)$. При подаче положительного сигнала переменный ток будет увеличиваться, а при подаче отрицательного сигнала — уменьшаться. Амплитуда отрицательного сигнала не должна превосходить величины добавочного подмагничивания. При таком способе получения полярности стремятся к тому, чтобы работа происходила на наиболее крутом участке характеристики; это выгодно с точки зрения увеличения регулирующей способности. Недостаток способа заключается в боль-

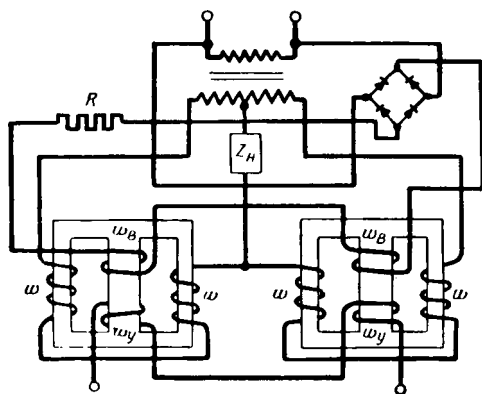


Рис. 9а.

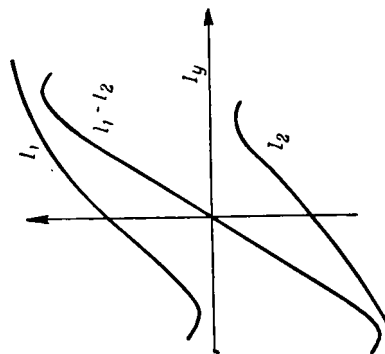


Рис. 9б.

шом токе холостого хода. Схемы с обратной связью также позволяют получить чувствительность к полярности первого вида. Полярность второго вида может быть получена следующими способами: 1) при дифференциальном включении, когда через нагрузку идет разность токов двух дросселей; 2) при мостовой схеме соединения дросселей, когда два дросселя включены в два противоположных плеча моста, а нагрузка включается в диагональ моста; 3) при трансформаторной схеме, когда нагрузка присоединяется к последовательно и встречно включенным вторичным обмоткам переменного тока двух трансформаторов с подмагничиванием.

Дифференциальные схемы. Дифференциальная схема представлена на рис. 9а. Она состоит из двух трехстержневых дросселей. Каждый из них имеет кроме обмоток переменного тока w и обмотки управления w_y обмотку вспомогательного подмагничивания w_B , питающуюся через сопротивление R и выпрямительный мост от сети. Ток в нагрузке равен разности токов двух дросселей. На рис. 9б даны кривые токов обоих дросселей I_1 и I_2 и кривая разности токов $(I_1 - I_2)$, проходящая через начало координат. Как видно из рис. 9б, изменение знака тока I_y вызывает изменение знака тока I . Практически при $I_y=0$ ток в нагрузке не равен нулю (имеется ток небаланса) за счет некоторой неодинаковости дросселей; необходимо путем дополнительной регулировки осуществить подгонку нуля.

Применение обратной связи в дифференциальных схемах позволяет получить большие ко-

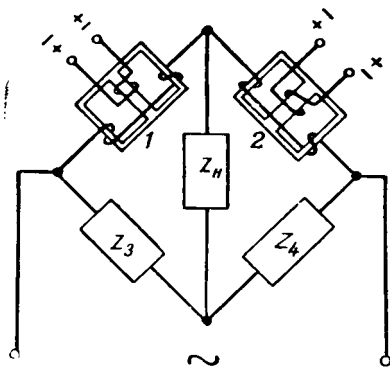


Рис. 10.

эффиценты усиления. Обратная связь может применяться или без вспомогательного подмагничивания или с ним. Роль вспомогательного подмагничивания заключается здесь не в создании условий чувствительности к полярности первого вида, как это было в схеме по рис. 8а (эти условия создаются здесь самим присутствием обратной связи), а в уменьшении токов холостого хода обоих дросселей.

Мостовые схемы. Принципиальная схема представлена на рис. 10. В первое и второе плечи моста включены дроссели со вспомогательным начальным подмагничиванием, а в третье и четвертое — однородные и равные сопротивления Z_3 и Z_4 . При отсутствии управляющего сигнала реактивные сопротивления обоих дросселей равны. Так как при этом выполняются условия

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \text{ и } \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4,$$

то мост уравновешен, и ток в диагонали, в которую включена нагрузка, практически равен нулю. Поле от управляющего сигнала в одном дросселе складывается с полем начального подмагничивания (обмотки начального подмагничивания на схеме не показаны), а в другом — вычитается. При появлении управляющего сигнала реактивное сопротивление одного дросселя увеличивается, а другого уменьшается, мост разбалансируется, и через нагрузку течет ток. Фаза этого тока зависит от полярности управляющего сигнала. Z_3 и Z_4 обычно выполняют или в виде активных сопротивлений или в виде конденсаторов, еще лучше, если они представляют собой нелинейные сопротивления.

Трансформаторные схемы. Трансформаторная схема дана на рис. 11. В ней имеется две пары дросселей (вернее трансформаторов) с подмагничиванием. Первая пара состоит из первого и второго, а вторая — из третьего и четвертого дросселей. Обмотки переменного тока w_1 включены последовательно и согласно, а вторичные обмотки переменного тока w_2 первого и второго дросселей включены встречно обмоткам w_2 третьего и четвертого дросселей. В схеме есть обмотки вспомогательного начального подмагничивания w_3 и обмотки управления w_u . Если в обмотках управления нет постоянного тока, то напряжение на выходе равно нулю, так как $U_1 + (-U_2) = 0$. При наличии тока

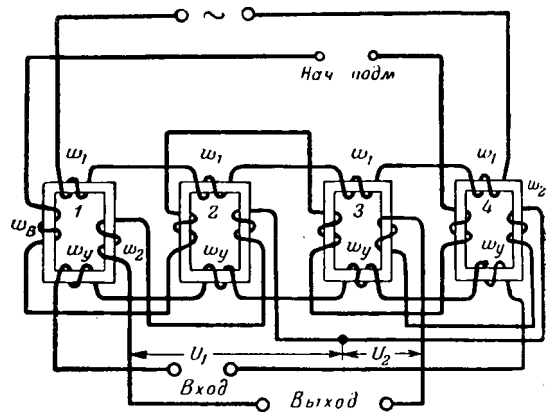


Рис. 11.

в обмотках управления w_u постоянное поле в одной паре дросселей направлено согласно, а в другой встречно полю начального подмагничивания, и на выходе появляется напряжение, фаза которого зависит от полярности тока управления. Наибольшее применение такие схемы получили в качестве схем магнитных усилителей напряжения. Достоинство таких схем заключается в том, что: 1) выход электрически изолирован от сети переменного тока и 2) увеличивая число витков w_2 , можно получить очень высокие коэффициенты усиления по напряжению. Под коэффициентом усиления по напряжению понимают отношение напряжения на выходе магнитного усилителя к напряжению постоянного тока, поступающему в обмотки управления.

Применение дросселей насыщения для измерения постоянных токов [Л. 1—6]. Измерение больших постоянных токов осуществляется обычно при помощи шунтов. В тех же случаях, когда постоянные токи достигают очень больших значений, например в электрохимии и в электротермии, где иногда применяются постоянные токи, достигающие 50—80 кА; или когда измерительное устройство должно быть компактным и не боящимся сотрясений, например на железных дорогах, электрифицированных на постоянном токе; или когда измерительное устройство должно быть изолировано от сети постоянного тока, например при передаче энергии постоянным током высокого напряжения, — в этих случаях оказывается целесообразным измерение больших постоянных токов производить при помощи дросселей насыщения. Дроссели насыщения, примененные для целей измерения постоянных токов, часто называют трансформаторами постоянного тока. Следует отметить, что название это не совсем удачно, так как постоянный ток в буквальном смысле слова вовсе не трансформируется в переменный ток.

Если в один из проводов, идущих к сети переменного тока, схемы рис. 1 включить амперметр, то такое устройство будет простейшим и в то же время одним из наилучших трансформаторов постоянного тока. Как видно из рис. 3б, переменный ток, забираемый из сети, является функцией не только постоянного тока \bar{I} , но и

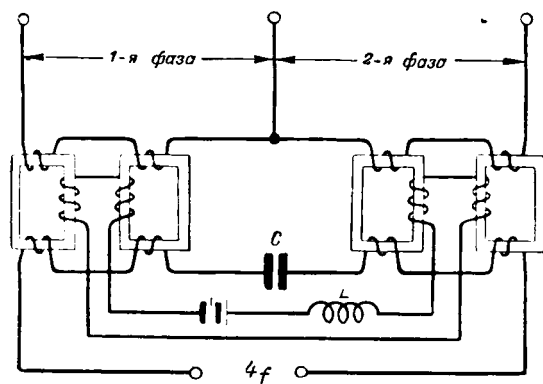


Рис. 12.

напряжения сети переменного тока. Отсюда следует, что для точности измерений необходимо, чтобы напряжение переменного тока было постоянным. Простейшим способом получения этого является питание через стабилизатор напряжения. Магнитопроводы дросселей, применяемых в трансформаторах постоянного тока, целесообразно выполнять из железо-никелевых сплавов. Они дают возможность уменьшить ток холостого хода и получить большую линейность привода $I = f(I_y)$. Как и обычным измерительным трансформаторам тока и напряжения, трансформаторам постоянного тока свойственна некоторая погрешность. При малых постоянных токах эта погрешность обычно положительна за счет тока холостого хода.

При больших постоянных токах погрешность, как правило, отрицательна за счет индуктивности рассеяния. Если постоянные токи, подлежащие измерению, весьма большие, то трансформаторы выполняют одновитковыми.

Умножение частоты в четное число раз [Л. 7—10]. Дроссели насыщения дают возможность умножать частоту в четное число раз. Принципиальная схема удвоителя частоты дана на рис. 4а. Рис. 4б поясняет принцип удвоения.

Если требования к чистоте формы удвоенного напряжения невелики, то иногда работают без настройки вторичного контура в резонанс на вторую гармонику. Если же нужно получить напряжение, в котором высшие гармоники заглушены, то во вторичную цепь включают резонансный контур, настроенный на вторую гармонику. Рассматриваемому удвоителю частоты свойственна падающая внешняя характеристика, т. е. с увеличением нагрузки напряжение удвоенной частоты снижается. Для получения менее падающей внешней характеристики оказывается полезным автоматически изменять величину подмагничивания при изменении нагрузки. Последнее может быть осуществлено путем устройства соответствующим образом рассчитанной обратной связи.

Умножение частоты в четыре раза может производиться несколькими способами. Первый способ состоит в применении той же схемы рис. 4а, но вторичная цепь в этом случае должна быть настроена на четвертую гармонику. Вторым способом состоит в каскадном включении двух умножителей, выполненных по схеме рис. 4а.

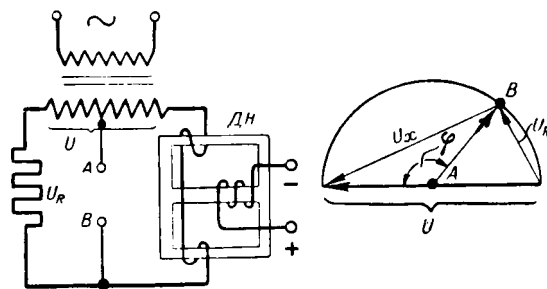


Рис. 13.

Третий способ состоит в применении схемы рис. 12 [Л. 7]. Эта схема состоит из двух удвоителей по рис. 4а; особенностью ее является двухфазное питание, причем первая и вторая фазы источника питания сдвинуты друг относительно друга на 90° . Все первичные обмотки соединены последовательно, вторичные — тоже последовательно, но попарно встречно. Так как сдвиг между первой и второй фазой на входе умножителя равен 90° , то сдвиг фаз между вторыми гармониками обоих удвоителей равен уже 180° ; иными словами, вторые гармоники находятся в противофазе и гасят друг друга. Четвертые гармоники обоих удвоителей сдвинуты на 360° , т. е. совпадают по фазе, шестые гармоники опять компенсируют друг друга и т. д. Для получения менее падающей внешней характеристики этой схемы целесообразно применить обратную связь.

Применение дросселей насыщения для регулирования сдвига фаз [Л. 11, 12]. На рис. 13 слева представлена схема мостика, а справа — ее круговая диаграмма. Схема позволяет изменять сдвиг фаз φ между полным напряжением вторичной обмотки трансформатора и напряжением между точками А и В. При изменении подмагничивания точка В перемещается по дуге окружности радиуса $\frac{U}{2}$. Когда дроссель подмаг-

ничен до предела, угол φ близок к нулю; когда же дроссель не подмагничен, угол φ близок к 180° .

Применение дросселей насыщения в электросварке. Дуговая сварка на переменном токе экономически гораздо выгоднее сварки на постоянном токе. Для получения хорошего качества сварки на переменном токе помимо соблюдения правильной технологии необходимо, чтобы источник питания имел падающую внешнюю характеристику. Последнее достигается обычно включением в цепь электрической дуги дросселя или трансформатора с повышенным рассеянием. Для той же цели может быть применен и дроссель насыщения. На рис. 14 дана схема применения дросселей насыщения в электросварке [Л. 13]. Ко вторичной обмотке понижающего сетевого трансформатора ($U_2 = 60-70$ В) подключены дроссель насыщения и сварочный пост. Подмагничивание дросселя пропорционально напряжению на электродах (при нормальной работе последнее равно $40 \div 50$ В).

Когда трансформатор Т включен, но дуга еще не горит, подмагничивание максимально.

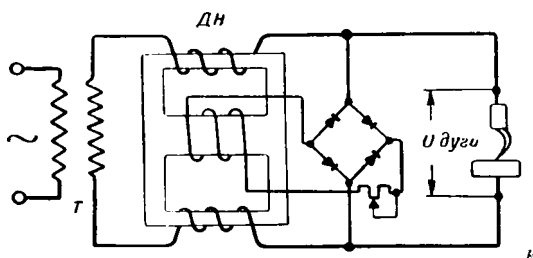


Рис. 14.

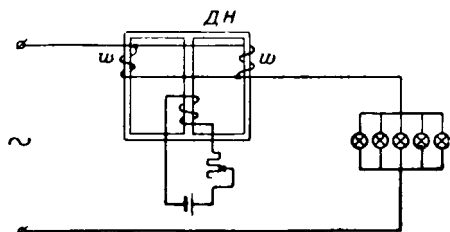


Рис. 15.

Для зажигания дуги надо на мгновение закоротить электроды, а затем раздвинуть их. При закоротении электродов напряжение на них падает практически до нуля, подмагничивание снижается, и реактивное сопротивление дросселя возрастает до максимума.

Ток короткого замыкания ограничивается максимально возможным реактивным сопротивлением дросселя, что препятствует пережогу и разбрызгиванию металла. При нормальной работе, когда напряжение на дуге порядка $40 \div 50$ В, реактивное сопротивление дросселя уменьшается, так как подмагничивание в этом режиме значительно.

Применение дросселей насыщения в осветительных установках [Л. 14—18]. В тех случаях, когда необходимо регулировать силу света плавно и в широких пределах, например в театрах, киностудиях, демонстрационных залах и т. п., с успехом могут быть применены дроссели насыщения. Принципиальная схема дана на рис. 15. Ламповая нагрузка включена последовательно с дросселем насыщения. Изменяя величину постоянного тока в обмотке ω , можно в широких пределах и плавно изменять силу света. Когда дроссель не подмагничен, напряжение на лампах минимально; при полностью подмагниченном дросселе напряжение на лампах максимально. В ряде случаев оказывается полезным включить до или после дросселя с подмагничиванием бустер-трансформатор. Назначение бустер-трансформатора в том, что он добавляет на лампы напряжение, которое было потеряно на дросселе, когда последний был полностью подмагничен. Такие регуляторы силы света не имеют движущихся частей и экономичны.

Применение дросселей насыщения в электропечах и в различных электронагревательных устройствах. Дроссели насыщения с успехом могут быть применены для регулирования электропечей. Существует большое количество различных схем. На рис. 16 [Л. 20] дана принци-

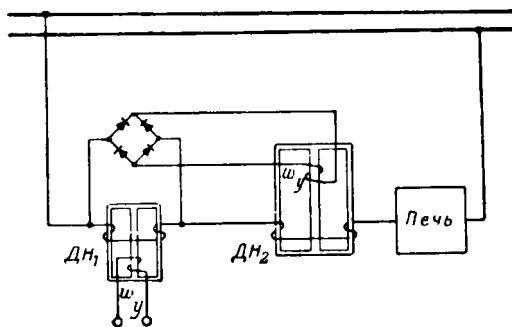


Рис. 16.

пиальная схема одной из них. В схеме есть два дросселя насыщения: маломощный $ДН_1$ и мощный $ДН_2$. Подмагничивание $ДН_1$ осуществляется от магнитного усилителя (на рис. 16 не показан), на вход которого поступает напряжение, пропорциональное температуре в печи. Подмагничивание $ДН_2$ осуществляется через выпрямительный мост от напряжения, приходящегося на дроссель $ДН_1$. Чем больше напряжение на $ДН_2$, тем меньше напряжение на печи, и наоборот. Схема работает следующим образом: если температура печи повысится, то подмагничивание $ДН_1$ увеличится. При этом уменьшится реактивное сопротивление $ДН_1$, уменьшится и падение напряжения на нем, что приведет к уменьшению подмагничивания дросселя $ДН_2$. Реактивное сопротивление всей цепи возрастет, вследствие чего ток в цепи уменьшится и температура в печи снизится. Если применяется ряд мощных дросселей насыщения, то питание обмотки управления их часто производится от тириатронов. Такая система реактор-тиратрон (сокращенное название — реактроль) применяется для закалочных печей, печей отжига, печей лабораторного типа, электрокотлов, печей нагрева воздуха и т. п. На рис. 17 дана схема использования дросселей с подмагничиванием, применяемая в устройстве, осуществляющем пастеризацию молока [Л. 22]. Силовая часть схемы состоит из дросселя насыщения $ДН$ и электродов, в пространстве между которыми находится молоко. В зависимости от величины подмагничивания $ДН$ меняется напряжение на электродах. Цепь управления состоит из понижающего трансформатора T , магнитного усилителя $МУ$ и купроксных выпрямителей. Отклонение температуры молока от номинала (равного $72,5^\circ\text{C}$) вызывает изменение напряжения на выходе измерительного моста. Это напряжение поступает на обмотку управления ω , магнитного усилителя. Если температура молока увеличится, то напряжение на выходе измерительного мостика уменьшится. С уменьшением подмагничивания $МУ$ уменьшится ток, протекающий по обмотке ω , $ДН$. Вследствие этого реактивное сопротивление $ДН$ возрастет, и напряжение на электродах снизится. Температура устанавливается при помощи реостата. Такое устройство позволяет производить пастеризацию молока равномерно по всему объему.

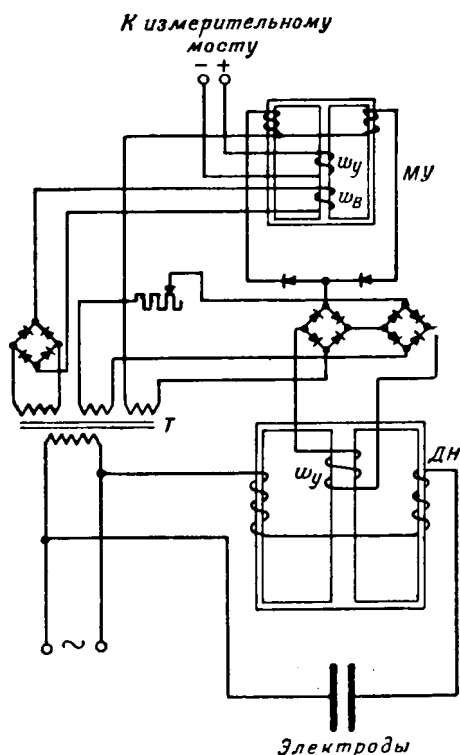


Рис. 17.

Плавное регулирование напряжения трансформаторов [Л. 23—26]. На рис. 18 представлена схема [Л. 23], состоящая из двух трансформаторов с подмагничиванием. Каждый из этих трансформаторов состоит в свою очередь из двух трансформаторов с П-образными сердечниками. Все первичные обмотки соединены последовательно и согласно и подключены к сети. Вторичные обмотки второго трансформатора соединены встречно вторичным обмоткам первого трансформатора. Вторичные обмотки включены в рассечку линии, идущей к потребителю. Если подмагничивание отсутствует, то напряжение у потребителя равно напряжению сети, так как вторичные обмотки трансформаторов соединены встречно. Подмагничиваться постоянным током может или левый или правый трансформатор, но не оба одновременно. Если подмагничивается левый трансформатор, то напряжение на нем уменьшается, а напряжение на правом увеличивается, вследствие чего напряжение у потребителя снижается по сравнению с напряжением сети (вычитается из напряжения сети больше, чем прибавляется). Если же подмагничивается правый трансформатор, то напряжение у потребителя становится больше напряжения сети. В литературе [Л. 23] описано такое устройство с регулировкой в $\pm 10\%$ от номинала.

Реактор, ограничивающий ток короткого замыкания. Идея применения дросселя насыщения для этой цели высказывалась неоднократно [Л. 27, 28]. В этом случае вместо обычного реактора, имеющего постоянную индуктивность, в линию включается дроссель насыщения. Дроссель, примененный для этой цели, в нашей литературе называют иногда компенсированным реакто-

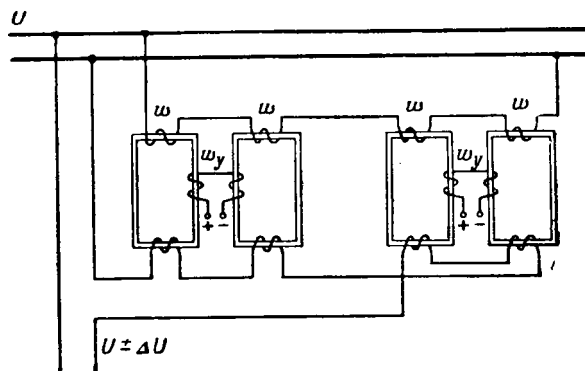


Рис. 18.

ром. При нормальной работе сети, когда ток в цепи номинален, дроссель насыщения подмагничен до максимума и рабочая точка на характеристиках рис. 3, а обозначена буквой *a*. В первое мгновение после короткого замыкания, когда переменный ток, проходящий по дросселю, возрастет, а постоянный ток остается без изменений, рабочее состояние будет изображаться точкой *b*, находящейся на той же кривой, что и точка *a*. В дальнейшем подмагничивание автоматически изменяется в зависимости от требуемого напряжения на шинах. Практически применение ДН в качестве токоограничивающего реактора определяется следующим: ДН должен быть изолирован на линейное напряжение и выполнен на номинальный ток нагрузки. Кроме того, конструктивно он должен быть выполнен весьма совершенно, чтобы не искажать форму тока в линии. Есть указание [Л. 29], что ДН, примененный в качестве токоограничивающего реактора, стоил дороже, чем трансформатор равной кажущейся мощности.

Дугогасящая катушка, настраиваемая постоянным током. Для компенсации емкостных токов на земле часто применяется дугогасящая катушка, включаемая в нейтраль сетевого трансформатора. Ее необходимо настраивать, чтобы лучше скомпенсировать емкостные токи. Настройка осуществляется обычно изменением числа витков катушки. Была высказана мысль [Л. 30, 31] о возможности настройки дугогасящей катушки при помощи подмагничивания постоянным током. Принципиальная схема автоматической настройки [Л. 32] изображена на рис. 19. Цифрой 1 обозначен силовой трансформатор, в нейтраль которого включена дугогасящая катушка 2; 3 — трансформатор напряжения; 4 — активное сопротивление для пробного смещения нейтрали; 5 — выключатель; 6 — автоматическое устройство для настройки. Выключатель 5 периодически включается и выключается. Когда он включен, нейтраль сместится на небольшую величину. Автоматическое устройство 6 измеряет это смещение и в зависимости от результатов измерения устанавливает подмагничивание катушки 2. Если в сети будет полное или частичное короткое замыкание на землю, то устройство 6 автоматически отключается и реактивное сопротивление катушки 2 остается таким, каким

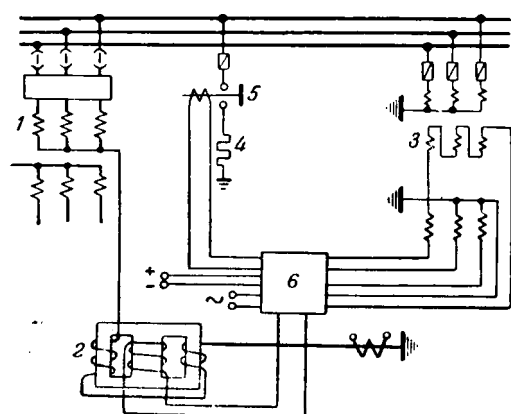


Рис. 19.

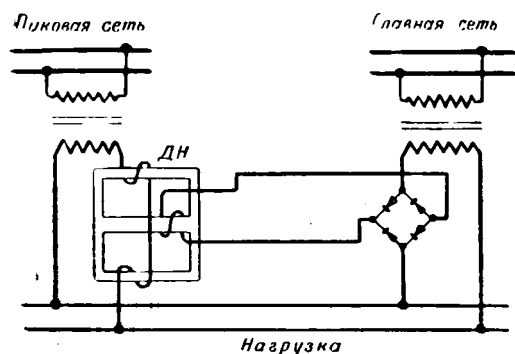


Рис. 20.

оно было установлено перед отключением устройства.

Регулирование работы сети, снимающей пик нагрузки. На рис. 20 изображены две сети: главная и «пиковая», которые питают нагрузку, причем «пиковая» сеть должна вступать в работу только при пиках нагрузки. «Пиковая» сеть подключена к нагрузке через дроссель насыщения ДН. Подмагничивание ДН пропорционально нагрузке. Если нагрузка мала, то реактивное сопротивление ДН велико, и «пиковая» сеть не питает нагрузку. При пиках нагрузки реактивное сопротивление ДН уменьшается, и «пиковая» сеть берет часть нагрузки на себя [Л. 29].

Стабилизация напряжения переменного тока. На рис. 21 представлена схема стабилизатора переменного тока [Л. 33]. В линию, идущую к потребителю, включается ДН, имеющий три обмотки постоянного тока: одну обмотку обратной связи и две обмотки управления. По обмотке w_{y1} течет выпрямленный ток, потребляемый магнитным усилителем МУ. Последний имеет три обмотки управления: обмотку последовательной обратной связи w_0 и две одинаковых обмотки управления w_{y1} и w_{y2} . Поля, создаваемые w_{y2} и w_0 , действуют согласно, а поле, создаваемое w_{y1} , действует встречно им.

Дроссель Д и сопротивление R подобраны таким образом, что при номинальном напряжении на выходе стабилизатора токи, протекающие через них, равны по величине. При этом поле, создаваемое w_{y1} , равно и встречно полю, созда-

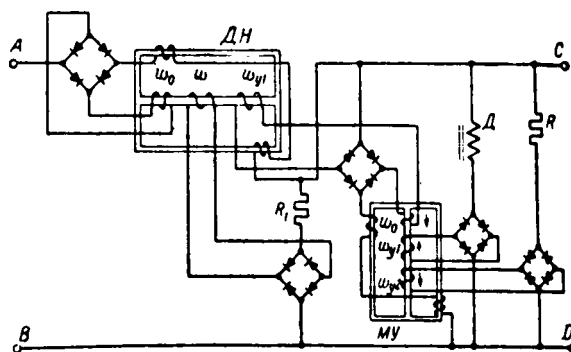


Рис. 21.

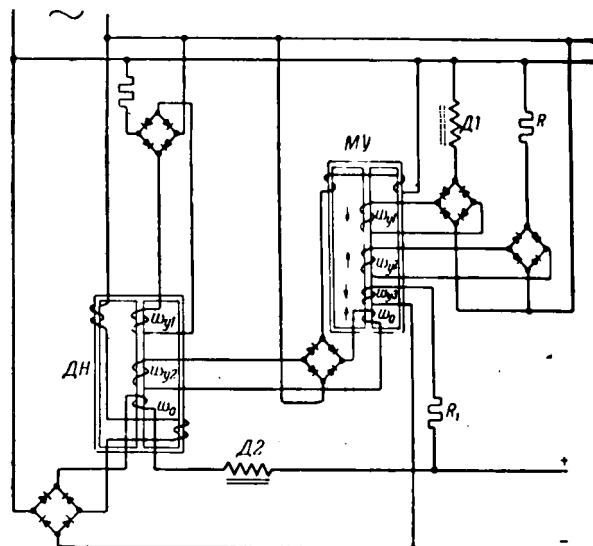


Рис. 22.

ваемому w_{y2} . Если напряжение на выходе стабилизатора станет выше номинала, то ток в цепи Д будет больше, чем ток в цепи R. В этом случае результирующее поле обмоток управления будет действовать встречно полю обратной связи, вследствие чего уменьшится ток в обмотке w_{y1} дросселя насыщения ДН. Реактивное сопротивление ДН возрастет, и напряжение на выходе стабилизатора снизится. Если напряжение на выходе станет ниже номинала, то результирующее поле обмоток управления будет действовать согласно с полем обратной связи. Ток в обмотке w_{y1} ДН увеличится, вследствие чего реактивное сопротивление ДН уменьшится. Для получения на выходе такого стабилизатора напряжения не ниже величины номинального напряжения питающей сети до ДН необходимо включить бустер-трансформатор.

Получение стабилизированного выпрямленного напряжения. На рис. 22 дана схема, позволяющая получить стабилизированное выпрямленное напряжение [Л. 33]. Выпрямленное напряжение сглаживается дросселем Д2. Магнитный усилитель МУ имеет три обмотки управления и одну обмотку обратной связи. Поле, создаваемое w_{y2} , встречно полю, создаваемому w_{y1} , и согласно с полем, создаваемым w_0 . Д1 и R подобраны таким образом, что при

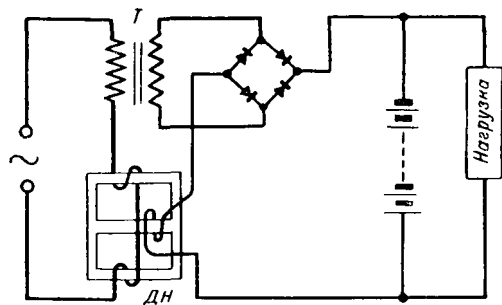


Рис. 23а

номинальном напряжении сети токи, протекающие через них, равны по величине. В отличие от схемы рис. 21 МУ имеет третью обмотку управления w_{y3} , по которой течет ток, пропорциональный стабилизированному напряжению. Настройка схемы осуществляется регулировкой R_1 .

Автоматическая зарядка аккумуляторных батарей [Л. 34—37]. Для увеличения срока службы буферных кислотных батарей необходимо, чтобы зарядка автоматически прекращалась, когда батарея будет достаточно заряжена. Такой режим может быть осуществлен схемами, в которых используются дроссели насыщения. Известно несколько таких схем. Мы рассмотрим две из них. В первой схеме [Л. 35], представленной на рис. 23а, к сети переменного тока подключены последовательно трансформатор T и дроссель насыщения $ДН$. Напряжение сети распределяется между T и $ДН$ пропорционально их полным сопротивлениям. Подаваемое через выпрямительный мост напряжение вторичной обмотки трансформатора служит для зарядки аккумуляторной батареи. Дроссель $ДН$ подмагничивается выпрямленным током. Нагрузка подключается параллельно аккумуляторной батарее. Пусть разряженная батарея включена на зарядку, а нагрузка отсутствует. По мере зарядки батареи зарядный ток будет автоматически уменьшаться, так как напряжение батареи направлено встречно выпрямленному напряжению. Уменьшение зарядного тока вызывает увеличение падения напряжения на $ДН$ и уменьшение на T . Наконец, наступает состояние, при котором зарядный ток становится равным нулю. Если включить теперь нагрузку, то батарея начнет на нее разряжаться. Напряжение батареи вскоре уменьшится и она автоматически начнет заряжаться. Более совершенная схема [Л. 37] представлена на рис. 23б; она во многом подобна схеме рис. 22. Обозначено: $СТ$ — сетевой трансформатор; $ТТ$ — трансформатор тока. Схеме свойственно резкое уменьшение выпрямленного напряжения, если от батареи будет забираться ток больше номинального. Такая самозащита от больших токов (и от короткого замыкания на шинах постоянного тока) осуществлена при помощи трансформатора тока $ТТ$, который через выпрямитель $В5$ питает обмотку w_{y3} магнитного усилителя. После, создаваемое w_{y3} , действует встречно полю w_0 и w_{y1} МУ. При коротком замыкании на шинах

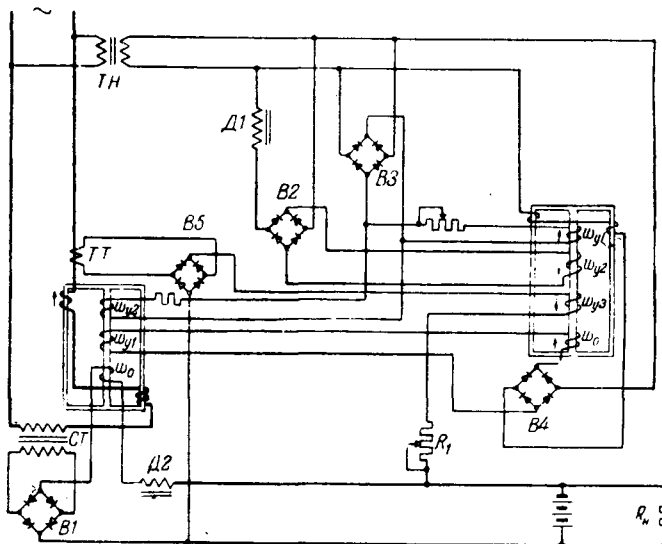


Рис. 23б.

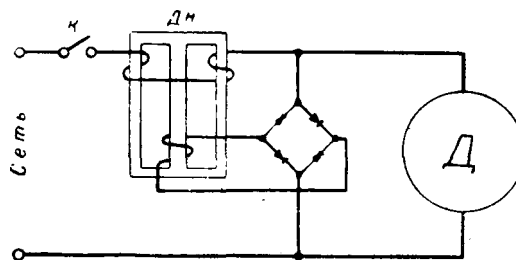


Рис. 24.

постоянного тока поле, создаваемое w_{y3} , резко возрастает, благодаря чему резко снижается ток, проходящий через w_{y1} $ДН$.

Регулирование переменных токов, подлежащих выпрямлению. Регулирование величины напряжения, выпрямленного твердыми выпрямителями, может производиться двояко. Первый способ заключается в применении схемы, состоящей из последовательно соединенных дросселя насыщения и трансформатора, ко вторичной обмотке которого подключается твердый выпрямитель. По второму способу применяется схема, состоящая из последовательно включенных дросселя насыщения и твердого выпрямителя.

Асинхронный пуск синхронных двигателей [Л. 38, 20]. Асинхронный пуск синхронных двигателей может осуществляться с применением или обычных дросселей, или автотрансформаторов, или переключением статора со звезды на треугольник, а также при помощи дросселей насыщения. На рис. 24 дана принципиальная схема [Л. 20]. Дроссель насыщения включен последовательно со статорной обмоткой двигателя. Подмагничивание $ДН$ пропорционально напряжению на двигателе. В первый момент после замыкания рубильника большая часть напряжения приходится на $ДН$, а на двигатель приходится лишь небольшое напряжение. По мере нарастания тока подмагничивания реактивное сопротивление $ДН$ будет уменьшаться, следовательно, напряжение на двигателе будет расти.

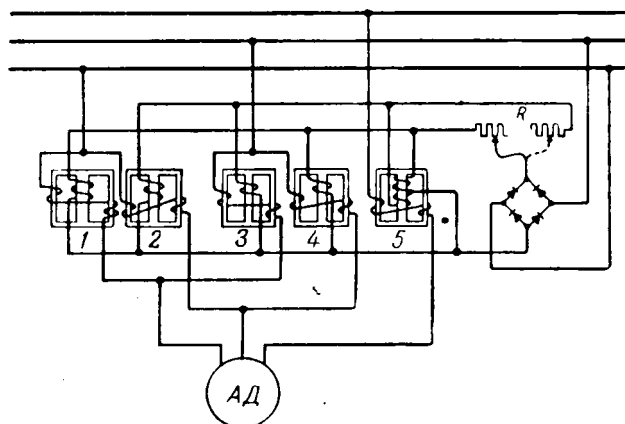


Рис. 25а.

Когда пуск будет закончен, дроссель насыщения можно короткнуть, а подмагничивающую цепь отключить. Основное достоинство схемы — отсутствие в ней масляных выключателей.

Регулирование скорости асинхронных двигателей с повышенным скольжением [Л. 39—42]. Регулирование скорости асинхронных двигателей производится разными методами. По первому методу [Л. 39] напряжение, приходящееся на двигатель, изменяется при помощи дросселей, включенных в каждую фазу двигателя (рис. 25а). При этом звезда напряжений на двигателе симметрична. В схеме всего пять дросселей. При вращении двигателя в одну сторону подмагничены дроссели 1, 4, 5, при вращении в другую — подмагничены дроссели 2, 3, 5. Дроссель 5 имеет две обмотки управления. Реостат R , при помощи которого регулируется ток в обмотках управления, имеет посередине разрыв.

Второй и более распространенный (в особенности в подъемных кранах) метод [Л. 41—42] заключается в создании при помощи дросселей насыщения несимметрии фазных напряжений двигателя. Рис. 25б поясняет этот метод. В одну из фаз включен ДН, который может подмагничиваться от вспомогательного трансформатора ТВ. Первичная обмотка последнего включена в диагональ мостового магнитного усилителя, состоящего из двух дросселей с подмагничиванием Д1 и Д2, включенных в плечи АЕ и ДВ, и двух дросселей без подмагничивания (плечи ЕВ и АД). Подмагничивание Д2 и Д1 производится выпрямленным напряжением вторичных обмоток трансформатора Т1, первичные обмотки которого приключены к ротору двигателя последовательно с емкостями С. Частота напряжения, наведенного в роторе двигателя, непостоянна. Так как емкость С изменяет свое реактивное сопротивление обратно пропорционально частоте, то напряжение на вторичных обмотках Т1 будет зависеть от изменения частоты. На сопротивлении R_1 , входящем в цепь подмагничивания Д1 и Д2, есть, кроме того, встречное падение напряжения от выпрямителей, включенных ко вторичной обмотке Т2.

В схеме есть еще дроссель Д и сопротивление R_2 , которые, будучи включены, приводят к еще большей несимметрии фазных напряжений.

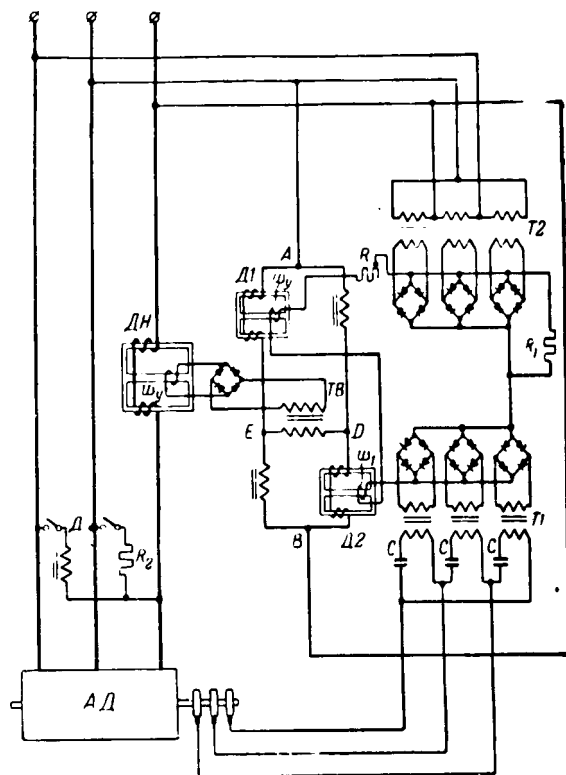


Рис. 25б.

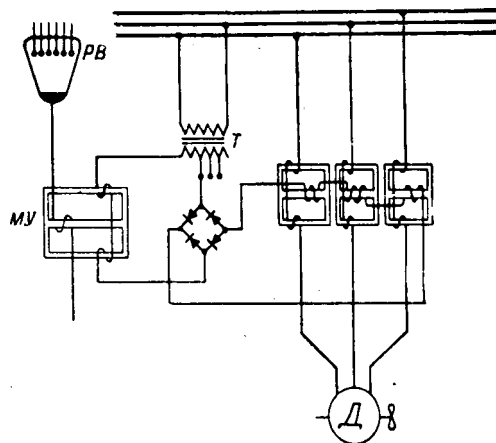


Рис. 26.

Несимметрия достигается настолько большая, что двигатель может реверсироваться (меняется последовательность фаз). Регулирование скорости производится измерением сопротивления R .

Автоматизированный привод. На рис. 26 дана схема автоматически действующего привода вентилятора, служащего для охлаждения ртутного выпрямителя (РВ) [Л. 43]. Обмотка управления магнитного усилителя (МУ) включена в рассечку катода РВ. Следовательно, подмагничивание МУ пропорционально нагрузке РВ. Подмагничивание же ДН производится выпрямленным током, потребляемым МУ из сети. Двигатель, приводящий вентилятор в действие, включен последовательно с ДН. При малой нагрузке ртутника, когда охлаждение не нужно, МУ подмагничен слабо. Следовательно, мал ток, потреб-

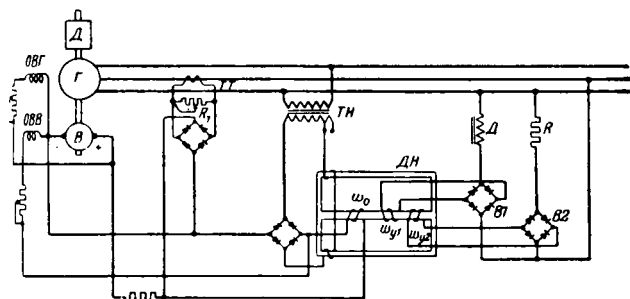


Рис. 27.

аемый им из сети. Мало и подмагничивание ДН. Реактивное сопротивление ДН при этом велико, и двигатель неподвижен. Если нагрузка лутника увеличится, то реактивное сопротивление МУ уменьшится, и это вызовет увеличение подмагничивания ДН. Реактивное сопротивление ДН уменьшится, и двигатель начнет вращаться. Чем больше нагрузка ртутного выпрямителя, тем с большей скоростью будет вращаться двигатель.

Поддержание постоянства скорости вращения шунтового двигателя постоянного тока при изменении напряжения питания [Л. 20]. Дроссель насыщения последовательно с активным сопротивлением и купроксным мостиком подключены к вспомогательной сети переменного тока. Выпрямленный купроксным мостиком ток идет в обмотку возбуждения двигателя. Обмотка управления ДН питается тем же напряжением, к которому подключен двигатель. При изменении напряжения постоянного тока изменяется подмагничивание ДН, это вызывает изменение тока, протекающего в цепи ДН, а следовательно, и изменение возбуждения двигателя.

Поддержание постоянства скорости вращения шунтового двигателя при изменениях нагрузки [Л. 20]. В отличие от предыдущего случая обмотка управления ДН питается не от напряжения сети постоянного тока, к которой присоединен двигатель, а от тахогенератора, находящегося на одном валу с двигателем.

Регулировка напряжения синхронного генератора [Л. 44—47]. На рис. 27 представлена схема автоматического регулирования напряжения синхронного генератора [Л. 44]. В ней Д — первичный двигатель; Г — генератор; В — возбудитель; ОБГ — обмотка возбуждения генератора; ОБВ — обмотка возбуждения возбудителя; ТТ — трансформатор тока; ТН — трансформатор напряжения. Принцип действия схемы сходен с принципом действия схем — рис. 21 и 22. Направление результирующего поля, создаваемого управляющими обмотками ω_{y1} и ω_{y2} , зависит от того, больше или меньше напряжение генератора номинала. Если $U > U_{ном}$, то $AW_{y1} > AW_{y2}$ и результирующее поле обмоток управления будет вычитаться из поля, создаваемого ω_0 , это приведет к уменьшению возбуждения генератора. При $U < U_{ном}$ будет обратная картина. В схеме осуществлена компаундировка при помощи трансформатора тока ТТ, который доставляет

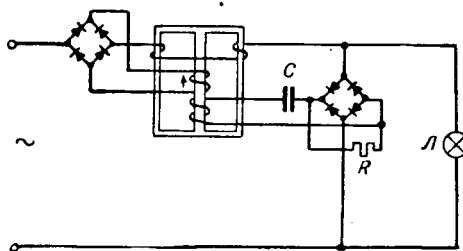


Рис. 28.

в обмотку ОБГ дополнительный ток возбуждения, пропорциональный току нагрузки.

Бесконтактное реле [Л. 33]. Выше мы отмечали, что характеристика $I = f(I_y)$ дросселя с подмагничиванием при наличии обратной связи идет круче, чем характеристика такого же дросселя без обратной связи (рис. 6, в). Изменяя число витков обратной связи, можно деформировать вид кривой $I = f(I_y)$ так, что она примет вид, изображенный пунктиром на рис. 6, в. Пунктирная кривая имеет почти вертикальный участок. Следовательно, малейшее изменение тока I_y вызовет резкое изменение тока нагрузки. Такая характеристика напоминает характеристику цепи феррорезонанса напряжений, в которой при определенных соотношениях параметров цепи характеристика $I = f(U)$ может иметь прямолинейный участок. По аналогии с феррорезонансными цепями назовем критической такую величину обратной связи, при которой характеристика дросселя имеет вид, изображенный пунктиром на рис. 6, в. Если величина обратной связи будет превосходить критическое значение, то характеристики $I = f(I_y)$ будут петлеобразными (своеобразный гистерезис).

При включении последовательно с дросселем, имеющим критическую обратную связь, какого-либо исполнительного механизма (например, обмотки контактора) оказывается возможным чрезвычайно малыми изменениями тока управления вызывать срабатывание исполнительного механизма. Работу дросселя, имеющего критическую обратную связь, можно трактовать, как работу высокочувствительного бесконтактного реле.

Мигающий свет. Схема, позволяющая получить мигающий свет [Л. 48], дана на рис. 28. Периодические вспышки лампы в ней объясняются сменяющимися друг друга процессами зарядки и разрядки конденсатора С. Поле, создаваемое обмоткой ω_y , при зарядке конденсатора действует согласно с полем, создаваемым обмоткой обратной связи ω_0 , вследствие чего при зарядке конденсатора напряжение на дросселе снижается, а на лампе растет. Затем конденсатор начнет разряжаться через сопротивление R, при этом поле, создаваемое ω_y , будет вычитаться из поля, создаваемого ω_0 , в соответствии с чем напряжение на дросселе растет, а на лампе падает.

Схема телеизмерения [Л. 50]. На рис. 29 дана схема, в которой показания измерительного

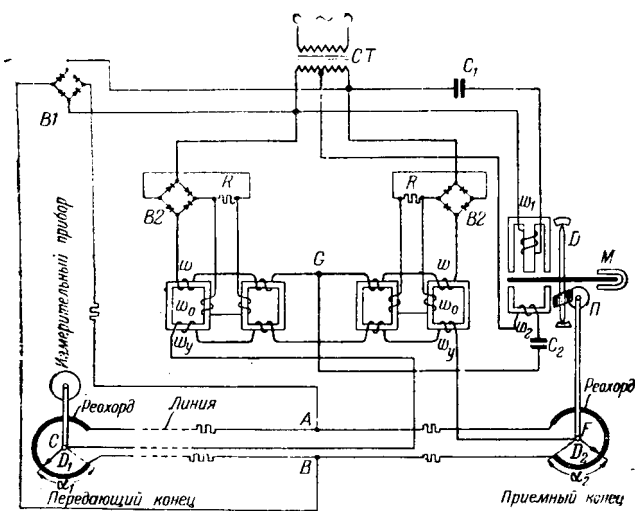


Рис. 29.

прибора на передающем конце (левая часть рисунка) точно воспроизводится на приемном конце (правая часть рисунка). На передающем и на приемном конце имеются одинаковые реохорды, по которым могут скользить движки (указатели) D_1 и D_2 . Реохорды эти и сопротивления линии соединены по мостиковой схеме так, что точки A и B являются концами одной, а точки C и F концами другой диагонали мостика. К точкам A и E подводится напряжение от выпрямительного мостика $B1$. Напряжение с выхода мостика (точки C и F) поступает на управляющие обмотки дифференциального магнитного усилителя с обратной связью. На выходе последнего присоединена цепь, состоящая из емкости C_2 и обмотки w_2 индукционного двигателя, выполненного по типу индукционного счетчика. Емкость C_2 подобрана так, что она компенсирует индуктивность обмотки w_2 . По цепи $C_2 w_2$ проходит ток, равный векторной разности токов первого и второго дросселей. Фаза этого тока относительно напряжения сети зависит от величины сигнала, поступающего с диагонали CF , и от величины активного сопротивления обмотки w_2 . Чем меньше сигнал и чем меньше активное сопротивление обмотки w_2 , тем меньше отличается она от 90° . Другая обмотка двигателя (w_1) и емкость C_1 присоединены непосредственно ко вторичной обмотке сетевого трансформатора T . Цепь $C_1 w_1$ настроена в резонанс, и ток, проходящий по ней, по фазе практически совпадает с напряжением сети. То обстоятельство, что токи, проходящие через w_1 и w_2 , сдвинуты друг относительно друга приблизительно на 90° , весьма благоприятно, так как при этом вращающий момент двигателя максимален. Движок D_2 реохорда приемного конца через червячную передачу P связан с якорем двигателя. Выпрямительные мостики $B2$ питают обмотки обратной связи. Сопротивления R служат для регулировки обратной связи и частично для температурной компенсации. M — демпфирующий магнит. Схема работает следующим образом: если произойдет изменение измеряемой величины, то движок D_1

переместится, равновесие мостика $ABCF$ нарушится и на выходе его (CF) появится напряжение. Фаза этого напряжения зависит от того, в какую сторону переместился движок D_1 . От этого же зависит и направление вращения двигателя D . Последний будет вращаться до тех пор, пока движок D_2 не придет в точно такое же положение, в каком находится движок D_1 . При этом напряжение на диагонали CF будет равно нулю.

Заключение. Дроссели насыщения представляют собой электрические аппараты, реактивное сопротивление которых регулируется изменением величины постоянного поля. Они широко применяются в качестве регулируемых реактивных сопротивлений, позволяющих перераспределять напряжение между отдельными элементами цепи, в качестве трансформаторов тока, умножителей частоты, магнитных усилителей, чувствительных реле и т. д. Дроссели насыщения не имеют движущихся частей, экономичны, работают бесшумно и долговечны. С одинаковым успехом выполняются они на мощности в доли вольтампер и на мощности в сотни, а в редких случаях и на тысячи киловольтампер. С одинаковым успехом применяются они как в технике сильных, так и в технике слабых токов. Огромное и все растущее применение находят они также в схемах автоматического управления и регулирования.

Литература

1. В. О. Маркс и В. Д. Алесин. Измерение больших сил постоянного тока с помощью измерительных трансформаторов. Измерительная техника, № 3 и 4—5, 1940.
2. А. Г. Никифоров. Измерительный трансформатор постоянного тока. ВЭП, № 10—11, стр. 17, 1939.
3. W. Krämer. Ein einfacher Gleichstrommesswandler mit echten Stromwandlereigenschaften. ETZ, № 49, стр. 1309, 1937.
4. H. Ritz. Gleichstrommesswandler. ATM, № 87, стр. 113, 1938.
5. W. Krämer. Prüfung des Gleichstromwandlers und seine Fehlerkompensation. AEG-M., № 5, стр. 265, 1939.
6. W. Krämer. Fremderregte Stromwandler als Universalwandler zum oszillographieren von Wechselströmen mit Gleichstromgliedern. ETZ, стр. 393, 1939.
7. L. Dreyfuss. Die analytische Theorie des statischen Frequenzverdopplers bei Leerlauf. A. i. E., т. 2, стр. 343, 1914.
8. Н. Н. Рукавишников и Н. П. Ермолин. Умножение частоты с помощью трансформаторов. Электричество, № 15, стр. 19, 1935.
9. В. П. Вологдин и М. А. Спицын. Генераторы высокой частоты. ОНТИ, 1935.
10. К. А. Круг. Основы электротехники. Госэнергоиздат, т. II, стр. 344, 1946.
11. W. Schilling. Vormagnetisierte Eisendrosseln für Regelkreise. E. u. M., стр. 397, 1941.
12. W. Schilling. Eine neue Schaltung Gittersteuerung von Stromrichtern mittels Gleichstrommagnetisierte Eisendrosseln. E. u. M., № 35—36, стр. 424, 1943.
13. К. И. Шенфер и А. А. Иванов. Дроссели насыщения для дуговой электросварки. ВЭП № 4—5, 1943.
14. B. S. Burke. Symphonies in Light. El. Journal, № 6, стр. 372, 1931.
15. V. Paetov. Transformator als Bühneregler. AEG, № 12, сmp. 376, 1932.
16. F. H. Macrae. Electricity in the Theatre, El. Rev., стр. 266, 1933.
17. Д. И. Марьяновский. Автоматическое регулирование напряжения дросселями насыщения. ВЭП, № 10, 1944.

18. Д. И. Марьяновский. Регулирование напряжения осветительной сети Дворца Советов. Бюллетень ВЭИ, № 1, 1941.
19. G. Hauffe. Die Oberwellen gleichstromvormagnetisierte einphasen Drosselspulen. Helios, стр. 521, 1937.
20. G. Hauffe. Anwendung Gleichstrom vormagnetisierter Drosselspulen in der Starkstromtechnik. ETZ, № 36, стр. 990, 1937. Указана литература за более ранний период.
21. G. Hauffe. A. i. E, № 1, стр. 41—47, 1939.
22. T. Hall. The Electric Pasteurizer. El. Eng., № 2, стр. 60, 1943.
23. A. Bayajian. Theory of D. C. Excited Iron Core Reactors. IAEE, стр. 958, 1924.
24. P. H. Odessey. A. D. C. Controlled Voltage Regulator. El. Eng., № 9, стр. 956, 1936.
25. В. А. Карасев. Авторское свидетельство № 55255 по классу 21 d².
26. М. А. Спицин. Способы автоматического регулирования напряжения в трехфазной сети. Авторское свидетельство № 55425.
27. F. Goffin. Improvising a Current Limiting Reactor by D. C. Excitation. GER, № 10, стр. 821, 1917.
28. Л. И. Мойжес. Компенсированный реактор, Электричество, № 2, 1941.
29. G. Hauffe. Gleichstromvormagnetisierte. Drosselspulen. ETZ, № 34, стр. 937 и № 36, стр. 989, 1937.
30. M. Terada. Groundind Reactor with D. C. Excited Iron Core Select Pap. Inst. El. Eng. Japan, № 16, 1928.
31. M. Terada. Löschdrossel mit Gleichstrom-Vormagnetisierung. ETZ, № 50, стр. 1726, 1930.
32. В. В. Гусев. Настройка катушки Петерсена постоянным током. Эл. станции, № 2, 1940.
33. U. H. Krabbe. Den Kopplingstekniska uppbyggnaden av Transductorregulator. ASEA Tidning, № 12, 1944.
34. K. Baudisch. Neuerungen im Bau und in der Verwendung von Kupfer-Oxydul-Gleichrichtern. ETZ, № 9, стр. 210, 1934.
35. K. Maier. Eine neue Kippdrossel. ETZ, № 42, стр. 1026, 1934.
36. P. Sporn, G. G. Langdon. Electronic Battery Charger. El. World, № 8, стр. 1889, 1935.
37. U. Lamm. ASEA J., № 1, стр. 3, 1947. Реферат: Электричество, № 10, стр. 78, 1947.
38. C. W. Drake. Saturable Reactor Starters for Synchronous Motors. El. Journal, № 4, стр. 178, 1936.
39. Л. Б. Гейлер. Современное развитие электрического привода. Электричество, № 11, 1935.
40. А. Г. Ивахненко. Устройство для автоматического регулирования асинхронных двигателей. Авторское свидетельство № 67781, Бюллетень изобретений, № 2, 1947.
41. W. R. Wickerham, C. B. Risler. An A. C. Crane Hoist with Reactor Control. Westinghouse Engineer, № 3, 1945.
42. W. R. Wickerham. Variable Unbalanced Voltage Control. El. Eng., № 3, 1945.
43. U. Lamm. The Transductor and its Application. ASEA, J., № 5—6, стр. 114, 1939.
44. C. P. West, T. Applegate. A Generator Voltage Regulator without Moving Parts. El. Journal, № 4, стр. 181, 1936.
45. И. И. Колкин. Регулятор напряжения компандированных синхронных генераторов. Эл. станции, № 4—5, стр. 23, 1946.
46. Г. Р. Герценберг. Регулирование напряжения для генераторов повышенной частоты. ВЭП, № 8, 1947.
47. U. H. Krabbe. Spanningregulator av transductortyp för mindre Växelstrom-generatoren. ASEA Tidning, № 5, стр. 83, 1945. Реферат: Электричество, № 7, стр. 78, 1947.
48. U. H. Krabbe. The Transductor: Principle and Application, ASEA J., № 9, 1947.
49. C. G. Suits. Flashing Lamps without Moving Parts. El. World, № 6, стр. 1098, 1932.
50. W. Geyger. Magnetische Verstärker für die Mess- und Regeltechnik. ETZ № 42—43, стр. 849—853; № 44—45, стр. 891—898, 1941.
51. W. Geyger. Magnetische Nullstrom-Verstärker. ATM, стр. 634, 1941.
52. U. Lamm. The Transductor. Стокгольм. 1943.
53. В. Г. Комар. Стабилизаторы напряжения и тока с феррорезонансным управлением дросселями насыщения. Электричество, № 11—12, 1944.
54. С. М. Осовец. Метод проектирования и расчета дросселей насыщения. Электричество, № 5, стр. 23, 1948.
55. М. А. Розенблат. Экспериментальное исследование магнитных усилителей с обратной связью. А. и Т. № 3, 1947.
56. C. V. Aggers, W. E. Pakalo. Direct Current Controlled Reactors. El. Journal, № 2, стр. 55, 1937.
57. Л. А. Бессонов. О потерях в стали при подмагничивании. ВЭП, № 12, 1947.
58. Л. А. Бессонов. Принципиальные схемы конструкций дросселей насыщения и магнитных усилителей. ВЭП № 4, 1948.
59. M. Giroz. Application des amplificateurs magnétiques au control et au réglage automatique de la temperature des fours. Bull. SFE, № 8, 1941.
60. Б. А. Барский. Быстродействующий автоматический потенциометр. Бюллетень ВЭИ, № 4, стр. 23, 1940.
61. A. Rosenstein, H. Barnett. Electronically Controlled Dry-Disk Rectifier. El. Eng., Trans., № 1, 1944.
62. Г. Р. Герценберг. Дроссель насыщения как усилитель мощности. А. и Т., № 2, 1938.
63. К. Вульфсон. О магнитном усилителе. ЖТФ № 11, стр. 1170, 1937.
64. А. А. Фельдбаум. Магнитный усилитель напряжения. А. и Т., № 5, 1939.
65. T. Ledward, DC/AC Converter. Wirelles World, № 8, 1943.
66. V. Lamm. ASEA Tidning, стр. 35, 1937.
67. M. Steenbeck, O. Schmutz. Stromrichtersteuerung mit Thermoelementen und magnetischen Verstärker. S. Z., том 15, стр. 201, 1935.
68. F. Friedländer, W. Wiskott. Zwei Vorschläge zur Regelung des Leistungsaustausches zwischen grossen Netzen. Bull. ASE, стр. 571, 1936.
69. A. Hornfeck, Electronically Operated Instruments for Industrial Measurement, El. Eng., № 1, 1947.
70. W. Scheuring. Die Spannungsregelung mittels gleichstromvorerregter Transformatoren. Е. и. М., № 28, стр. 326, 1934.

Проектирование и расчет дросселей насыщения

Ст. научный сотрудник С. М. ОСОВЕЦ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Среди различных методов экономического регулирования мощности в цепях переменного тока в последнее время получили широкое применение электромагнитные усилители или дроссели насыщения.

Дроссели насыщения обладают рядом преимуществ по сравнению с усилительными устройствами других типов (реле, электронно-ионные усилители, электромеханические усилители) из-за чрезвычайной простоты устройства, отсутствия движущихся частей и контактов, большей надежности в эксплуатации и т. д. Основным недостатком электромагнитных усилителей является наличие инерционности, из-за чего они обычно применяются в системах регулирования сравнительно медленных процессов.

Принципиальная схема работы дросселя насыщения представлена на рис. 1. Если к обмотке, включенной последовательно с нагрузкой, приложить переменное напряжение $U_{\max} \sin \omega t$, то ток будет определяться полным сопротивлением нагрузки и реактивным сопротивлением обмотки. Реактивное сопротивление обмотки I определяется степенью насыщения магнитной

Излагается метод аналитического исследования основных процессов в дросселе насыщения. На основании выведенных соотношений, определяющих собой характер процесса, устанавливаются исходные зависимости, необходимые для рационального проектирования дросселей насыщения. Результаты экспериментов подтверждают правильность принятых методов расчета.

цепи. Изменение магнитного насыщения осуществляется с помощью дополнительной обмотки II, которая обтекается постоянным током. Эту обмотку в дальнейшем бу-

дем называть подпитывающей обмоткой. При изменении тока в подпитывающей обмотке II изменяется насыщение магнитной цепи, а следовательно, изменяется реактивное сопротивление и величина тока обмотки I.

Работу дросселя насыщения можно характеризовать следующими отношениями:

1. Отношением между эффективными значениями тока I_a , протекающего через обмотку I, при наличии тока в подпитывающей обмотке и тока I_0 , протекающего через обмотку I при отсутствии тока в подпитывающей обмотке. Назовем это отношение коэффициентом

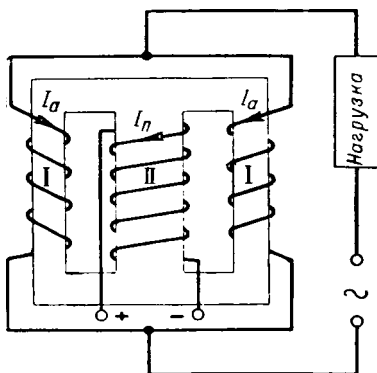
Усиления тока и обозначим $\mu = \frac{I_a}{I_0} = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_0}$. Ток I_0 в дальнейшем будем называть начальным током дросселя.

2. Мощности, отдаваемой во внешнюю нагрузку, к мощности, забираемой из сети. Это отношение назовем коэффициентом мощности и обозначим $\eta = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_0}$.

3. Отдаваемой мощности $P_{\text{нагр}}$ к мощности, теряемой в подпитывающей обмотке P_n . Назовем эту величину коэффициентом усиления мощности и обозначим $\lambda = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_n}$.

Для проектирования дросселя насыщения необходимо разработать такие методы расчета, с помощью которых можно было бы установить зависимость между вышеприведенными соотношениями и конструктивными параметрами дросселя.

Основная трудность настоящей задачи заключается в том, что рассматриваемая система яв-



Фиг. 1.

ляется нелинейной. Кривую намагничивания необходимо представить в виде некоторой аналитической зависимости, которая должна быть выбрана, исходя из соображений:

а) выбранная аналитическая зависимость должна достаточно приближаться к действительной кривой намагничивания;

б) вид этой зависимости должен быть таким, чтобы в итоге могли быть получены соотношения в виде, достаточно удобном для практических расчетов.

Одно из известных уравнений кривой намагничивания, удовлетворяющее обоим этим требованиям:

$$AW = a \operatorname{sh} \beta B. \quad (1)$$

Величины a и β определим из условия пересечения выбранной аналитической кривой с действительной кривой намагничивания в двух точках с координатами B_1, AW_1 и B_2, AW_2 . Тогда уравнение (1) представится в виде (приложение 1)

$$AW = \frac{AW_1}{\operatorname{sh}\left(\frac{s}{k-1}\right)} \operatorname{sh}\left[\frac{s \frac{B}{B_1}}{k-1}\right]. \quad (2)$$

Это соотношение устанавливает зависимость между относительными значениями ампервитков $\frac{AW}{AW_1}$ и относитель-

ным значением индукций $\frac{B}{B_1}$, в функции двух параметров $s = \ln \frac{AW_2}{AW_1}$ и $k = \frac{B_2}{B_1}$. Если принять, что отношение

$\frac{AW_2}{AW_1} = e^s$ выбрано для всех случаев одинаковым, например $\frac{AW_2}{AW_1} = 10$ или $s = 2,31$, то остается только один пе-

ременный параметр k , определяющий кривую намагничивания. При этом величины AW_1 и AW_2 выбираются таким образом, чтобы область изменения значений ампервитков для конкретного рассматриваемого режима работы дросселя лежала бы между этими величинами.

На рис. 2 приведены действительные кривые намагничивания для пермаллоя 45 (1) и трансформаторной стали (2), показанные сплошными линиями, и расчетные кривые, построенные на основании уравнения (2) (пунктирные линии). Из сравнения этих кривых можно сделать вывод, что аналитические кривые достаточно близки к действительным кривым намагничивания.

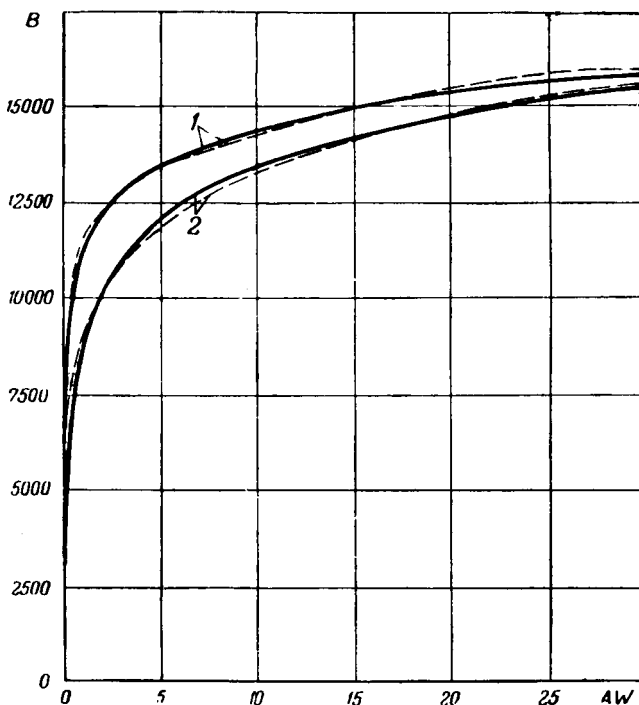
В дальнейшем мы пренебрегаем активными потерями в стали, остаточным магнетизмом и потоками рассеяния, а также считаем, что обмотки переменного тока, расположенные на различных стержнях, не взаимодействуют друг с другом и не воздействуют на цепь подпитывающей обмотки. Обоснование принятых допущений и учет получающихся при этом ошибок приведен ниже.

В простейшем случае определим величину начального тока i_0 , полагая, что он определяется исключительно индуктивностью цепи и не зависит от активного сопротивления, которое считаем достаточно малым. Уравнение электрического равновесия цепи

$$w_a \frac{d\Phi}{dt} = U_{\max} \sin \omega t; \quad (3)$$

уравнение магнитного равновесия

$$i_0 w_a = \frac{AW_1}{\operatorname{sh}\left(\frac{s}{k-1}\right)} \operatorname{sh}\left[\frac{s\Phi}{(k-1)q_c B_1}\right] \quad (4)$$



Фиг. 2.

(w_a — число витков обмотки переменного тока, расположенной на одном стержне; q_c — полезное сечение магнитопровода). Совместное решение этих двух уравнений имеет вид (приложение 2):

$$i_0 w_a = -\frac{2AW_1}{\operatorname{sh}\left(\frac{s}{k-1}\right)} \left[I_1(Q \cos \omega t + I_3(Q) \cos 3\omega t + I_5(Q) \cos 5\omega t + \dots \right]. \quad (5)$$

Эффективное значение тока

$$I_0 = \frac{AW_1}{\sqrt{2} \operatorname{sh}\left(\frac{s}{k-1}\right)} \sqrt{I_0(2Q)-1}, \quad (6)$$

здесь $Q = \frac{s U_{\max}}{\omega w_a (k-1) q_c B_1} = \frac{s B_{\max}}{(k-1) B_1}$ — безразмер-

ный параметр;

$I_0(Q), I_1(Q) \dots$ — функции Бесселя первого рода соответствующих порядков от чисто мнимого аргумента. Таким образом, для рассматриваемого случая можно определить форму кривой начального тока и его эффективное значение.

Перейдем к определению основных соотношений, характеризующих работу дросселя насыщения при наличии подпитки. Рассмотрим случай включения дросселя на сеть, пренебрегая активным сопротивлением цепи. При этом уравнение электрического равновесия остается прежним (3), но в решении его постоянная интегрирования будет отлична от нуля, т. е.

$$\Phi = C - \frac{U_{\max}}{\omega w_a} \cos \omega t. \quad (7)$$

Уравнение магнитного равновесия для этого случая

$$i_a w_a + I_n w_n = \frac{AW_1}{\operatorname{sh}\left(\frac{s}{k-1}\right)} \operatorname{sh}\left[\frac{s\Phi}{(k-1)q_c B_1}\right] \quad (8)$$

w_n — число витков подпитывающей обмотки; I_n — величина тока подпитки. Подставляя в (8) значение потока

из (7), из условия равенства нулю постоянной составляющей тока i_a находим (приложение 3), что

$$\operatorname{sh} \left[\frac{sC}{(k-1)q_c B_1} \right] = \frac{I_n w_n \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}{A W_1 I_0(Q)}. \quad (9)$$

Постоянная интегрирования C в (9) представляет собой постоянную составляющую потока, сцепленного с обмоткой переменного тока, и определяется не только ампервитками $I_n w_n$, но также существенно зависит от Q , которое в свою очередь определяется переменной составляющей потока. Таким образом, можно установить степень влияния амплитуды приложенного напряжения переменного тока на постоянную составляющую потока.

Уменьшение постоянной составляющей потока из-за наличия переменного потока является следствием нелинейности рассматриваемой цепи. Значение тока определяется выражением вида:

$$i_a w_a = \frac{2I_n w_n}{I_0(Q)} [I_2(Q) \cos 2\omega t + I_4(Q) \cos 4\omega t + \dots] - 2 \sqrt{\left[\frac{A W_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \right]^2 + \left[\frac{I_n w_n}{I_0(Q)} \right]^2} [I_1(Q) \cos \omega t + I_3(Q) \cos 3\omega t + \dots]. \quad (10)$$

Эффективный ток при этом будет:

$$I_a w_a = \sqrt{(I_0 w_a)^2 + (I_n w_n)^2 \left[\frac{I_0(2Q)}{I_0^2(Q)} - 1 \right]}. \quad (11)$$

Если первое слагаемое в подкоренном выражении относительно мало, что обычно и имеет место,

$$I_a w_a \approx I_n w_n \sqrt{\frac{I_0(2Q)}{I_0^2(Q)} - 1}, \quad (12)$$

т. е. эффективное значение переменного тока, протекающего через дроссель, пропорционально току подпитки.

Разделив (12) на (6), получим коэффициент усиления по току

$$K = \frac{I_a}{I_0} = \frac{\sqrt{2} I_n w_n \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}{A W_1} \sqrt{\frac{I_0(2Q) - I_0^2(Q)}{I_0^2(Q)[I_0(2Q) - 1]}}. \quad (13)$$

Исследование работы дросселя при нагрузке следовало бы проводить для самого общего случая, т. е. когда общее сопротивление нагрузки содержит в себе составляющие R, L и C . Однако, математические трудности, возникающие при попытках аналитического исследования дифференциальных уравнений, описывающих поведение такой цепи, настолько велики, что получить достаточно надежные количественные результаты оказывается практически невозможным. Поэтому рассмотрение работы дросселя при нагрузке ограничим исследованием наиболее простого случая — нагрузки в виде активного сопротивления. Этот вид нагрузки является наиболее распространенным в практическом применении дросселей насыщения.

Для случая активной нагрузки задача решается до конца. Исходными уравнениями электрического и магнитного равновесия при этом являются уравнения.

$$\left. \begin{aligned} w_a \frac{d\Phi}{dt} + Ri_a &= U_{\max} \sin \omega t, \\ i_a w_a + I_n w_n &= \frac{A W_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \operatorname{sh} \left[\frac{s\Phi}{(k-1)q_c B_1} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

При введении безразмерных параметров совместное рассмотрение системы (14) относительно переменной $\frac{s\Phi}{(k-1)q_c B_1}$ приводит к уравнению вида:

$$\frac{dz}{d\tau} + \varepsilon Q(z^2 - 1) = Qz(\sin \tau + p). \quad (15)$$

Здесь

$$\tau = \omega t, \quad \varepsilon = \frac{R A W_1}{2 U_{\max} w_a \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}, \quad p = \frac{I_n w_n R}{U_{\max} w_a}.$$

Полученное уравнение типа уравнения Риккати не может быть разрешено в квадратурах. Однако, в рассматриваемом случае с достаточной для технических расчетов степенью приближения можно принять $z^2 \gg 1$, начиная с неких (численно достаточно малых) значений $I_n w_n$. Пренебрегая величиной εQ в уравнении (15), мы тем самым приводим его к уравнению Бернулли, разрешаемому в квадратурах. По существу своему это упрощение означает, что мы представляем кривую намагничивания в виде показательной функции. Это приближение, вдали от начала координат, дает достаточно близкое совпадение с принятой ранее зависимостью. Наличие значительных подпитывающих ампервитков приводит к тому, что дроссель работает в области больших насыщений, так что принятое допущение окажет сравнительно малое влияние на результаты проведенных расчетов.

Решение уравнения

$$\frac{dz}{d\tau} + \varepsilon Q z^2 = Qz(\sin \tau + p) \quad (16)$$

имеет вид:

$$z = \frac{e^{Q(p\tau - \cos \tau)}}{Q \int e^{Q(p\tau - \cos \tau)} d\tau + C} \quad (17)$$

Отсюда может быть получено выражение для относительного значения тока стационарного режима:

$$i = \frac{I_a R}{U_{\max}} = \frac{e^{-Q \cos \tau}}{e^{-Q \cos \tau} + \int_1^\infty (-1)^n \frac{I_n(Q)}{n^2 + (pQ)^2} [n \sin n\tau + pQ \cos n\tau] d\tau} - 1. \quad (18)$$

Очевидно, что правая часть уравнения (18) также является некоторой гармонической функцией, которая может быть представлена бесконечным рядом, так что

$$= \sum_1^\infty (A_n \cos n\tau + B_n \sin n\tau), \quad (19)$$

где коэффициенты A_n и B_n определяются параметрами Q и p . Значения A_n и B_n в функции этих параметров вычислены по значениям $i = f(\tau)$ из уравнения (18). Результаты вычислений сведены в табл. 1 и 2.

Эффективное значение величины относительного тока,

$$\text{очевидно, будет равно } \frac{I_a R}{U \sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 d\tau}, \text{ где } U -$$

эффективное напряжение сети. Откуда $\frac{I_a R}{U \sqrt{2}} =$

$$= \sqrt{\frac{\sum_1^\infty (A_n^2 + B_n^2)}{2}}. \text{ Таким образом, для рассмат-}$$

риваемого случая коэффициент мощности

$$\eta = \frac{P_{\text{наг}}}{P_0} = \frac{I_a^2 R}{U I_a} = \frac{I_a R}{U} = \sqrt{\sum_1^\infty (A_n^2 + B_n^2)}. \quad (20)$$

Таблица 1

p	τ i	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{5}{6}\pi$	π	$\frac{7}{6}\pi$	$\frac{4}{3}\pi$	$\frac{3}{2}\pi$	$\frac{5}{3}\pi$	$\frac{11}{6}\pi$
$p=0,2$	$Q=2$	-0,18568	-0,1772	-0,1462	-0,0386	0,22	0,408	0,332	0,118	-0,052	-0,1035	-0,1732	-0,1812
	$Q=4$	-0,1993	-0,1989	-0,155	0,053	0,362	0,542	0,324	0,02	-0,128	-0,189	-0,1974	-0,199
	$Q=6$	-0,1997	-0,1999	-0,1475	0,151	0,483	0,62	0,256	-0,048	-0,19	-0,199	-0,199	-0,1995
	$Q=8$	-0,2	-0,2	-0,184	0,197	0,456	0,652	0,294	-0,0848	-0,197	-0,199	-0,2	-0,2
$p=0,4$	$Q=2$	-0,374	-0,184	-0,078	0,318	0,682	0,648	0,376	-0,067	-0,303	-0,376	-0,397	-0,398
	$Q=4$	-0,3904	-0,14	0,22	0,532	0,82	0,532	0,22	-0,14	-0,39	-0,39	-0,39	-0,4
	$Q=6$	-0,386	-0,342	0,134	0,392	0,93	0,81	0,337	-0,112	-0,305	-0,385	-0,395	-0,39
	$Q=8$	-0,378	-0,254	0,132	0,554	0,957	0,617	0,175	-0,186	-0,36	-0,388	-0,39	-0,387
$p=0,6$	$Q=2$	-0,3966	-0,205	-0,098	0,462	0,802	0,72	0,369	0,012	-0,258	-0,415	-0,481	-0,492
	$Q=4$	-0,402	-0,122	0,457	0,83	0,94	0,64	0,12	-0,342	-0,578	-0,598	-0,598	-0,588
	$Q=6$	-0,473	-0,158	0,246	0,752	0,988	0,617	0,18	-0,224	-0,47	-0,578	-0,599	-0,582
	$Q=8$	-0,418	-0,034	0,386	0,782	0,934	0,574	0,192	-0,261	-0,55	-0,596	-0,598	-0,573
$p=0,8$	$Q=2$	-0,39	-0,038	0,285	0,648	0,918	0,68	0,36	-0,0456	-0,362	-0,64	-0,704	-0,632
	$Q=4$	-0,308	-0,076	0,496	0,847	0,952	0,619	0,207	-0,208	-0,503	-0,718	-0,75	-0,582
	$Q=6$	-0,328	-0,117	0,568	0,947	0,956	0,582	0,1345	-0,28	-0,564	-0,77	-0,723	-0,586
	$Q=8$	-0,248	-0,102	0,496	0,894	0,928	0,535	0,12	-0,317	-0,619	-0,783	-0,787	-0,627
$p=1$	$Q=2$	-0,486	-0,132	0,473	0,87	0,93	0,64	0,304	-0,098	-0,423	-0,69	-0,764	-0,707
	$Q=4$	-0,348	-0,037	0,497	0,938	0,962	0,61	0,17	-0,269	-0,587	-0,667	-0,676	-0,62
	$Q=6$	-0,134	-0,276	0,678	0,972	0,954	0,555	0,146	-0,317	-0,686	-0,974	0,932	-0,616
	$Q=8$	-0,178	-0,662	0,978	0,867	0,485	0,097	-0,292	-0,673	-0,972	-0,951	-0,648	-0,277

Таблица 2

p		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
$p=0,2$	$Q=2$	-0,261	0,1037	-0,0384	0,00545	-0,0043	0,0029	0,00588	-0,0027	0,00505	-0,00188	0,00057
	$Q=4$	-0,319	0,156	-0,047	0,0089	-0,0053	0,0033	0,0186	-0,0113	0,0043	-0,00374	0,01
	$Q=6$	-0,362	0,1877	-0,053	0,019	-0,0143	0,012	0,047	-0,0615	0,011	-0,004	0,0021
	$Q=8$	-0,393	0,2	-0,0714	0,0145	-0,0165	0,00795	0,052	-0,0496	0,0245	-0,0029	0,0039
$p=0,4$	$Q=2$	-0,497	0,167	-0,05	0,00833	-0,008	0,0056	0,181	-0,0555	0,0242	-0,0272	0,0145
	$Q=4$	-0,56	0,206	-0,053	0,0148	-0,012	0,005	0,317	0,144	0,0437	-0,0285	0,018
	$Q=6$	-0,579	0,245	-0,0575	0,00417	-0,032	0,00152	0,389	-0,109	0,0817	-0,022	0,004
	$Q=8$	-0,582	0,1263	-0,012	0,0085	-0,0218	0,00152	0,417	-0,227	0,063	-0,0188	0,002
$p=0,6$	$Q=2$	-0,59	0,133	-0,0197	0,0328	-0,0025	0,00116	0,276	-0,085	0,0587	-0,0157	0,025
	$Q=4$	-0,643	0,162	-0,0224	0,0062	-0,0108	0,002	0,482	-0,169	0,048	-0,0027	0,0085
	$Q=6$	-0,638	0,09	-0,0255	0,00473	-0,0145	0	0,582	-0,171	0,053	-0,032	0,01
	$Q=8$	-0,6	0,064	-0,032	0,0028	-0,01	0	0,68	-0,187	0,0064	-0,052	0,012
$p=0,8$	$Q=2$	-0,66	0,035	-0,018	0,014	-0,01	0,0063	0,439	-0,0992	0,0374	-0,03	0,00178
	$Q=4$	-0,72	0,016	-0,02	0,0018	-0,0015	0,005	0,56	-0,0412	0,029	-0,027	0,0014
	$Q=6$	-0,65	0,001	-0,0237	0	0	0	0,695	-0,068	0,0134	-0,012	0,0013
	$Q=8$	-0,638	0,0003	-0,0218	0	0	0	0,723	-0,0858	0,009	-0,009	0,0042
$p=1$	$Q=2$	-0,737	0,001	-0,024	0,003	0	0	0,465	-0,11	0,009	-0,0079	0,004
	$Q=4$	-0,653	0,016	-0,013	0	0	0	0,68	-0,139	0,0137	-0,006	0,0015
	$Q=6$	-0,598	0,0145	-0,01	0	0	0	0,766	-0,15	0,06	0	0
	$Q=8$	-0,542	0,011	-0,008	0	0	0	0,81	-0,17	0,082	0	0

При выводе приведенных выше соотношений рассматривалась некоторая идеализированная система, в которой не учитывались определенные взаимодействия, имеющие место в реальном дросселе. Здесь прежде всего следует учесть то обстоятельство, что в дросселях насыщения нормальной конструкции, трехстержневых или четырехстержневых имеются две обмотки переменного тока, расположенные на различных стержнях, которые определенным образом взаимодействуют друг с другом. Характер этого взаимодействия определяется способом соединения этих обмоток между собой.

Рассмотрим имеющие место взаимоотношения при параллельном и при последовательном соединении обмоток переменного тока. В первом приближении пренебрежем потоками рассеяния и активными потерями. Тогда при параллельном соединении для синусоидального напряжения сети поток в каждом из стержней, на которых расположены обмотки переменного тока, будет также синусоидальным и будет иметь постоянную составляющую, определяемую ампервитками подпитки. Мгновенные значения токов в обмотках переменного тока при этом будут различны и сдвинуты по отношению к основной

гармонике на угол π , так как обмотки, расположенные на различных стержнях, намотаны в противоположных направлениях поэтому в уравнениях магнитного равновесия ампервитки подпитки будут отличаться по знаку.

Приняв соответственно для каждой цепи индексы 1 и 2 и считая, что числа витков на каждой из обмоток переменного тока одинаковы, получим следующие уравнения электрического и магнитного равновесия:

$$\omega w_a \frac{d\Phi_1}{d\tau} = U_{\max} \sin \tau; \quad \Phi_1 = C_1 - \frac{U_{\max}}{\omega w_a} \cos \tau;$$

$$\omega w_a \frac{d\Phi_2}{d\tau} = U_{\max} \sin \tau; \quad \Phi_2 = C_2 - \frac{U_{\max}}{\omega w_a} \cos \tau;$$

$$i_{a1} w_a + I_n w_n = \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \operatorname{sh} \left[\frac{s\Phi_1}{q_c B_1 (k-1)} \right] =$$

$$= \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \operatorname{sh} \left[\frac{s \left(C_1 - \frac{U_{\max} \cos \tau}{\omega w_a} \right)}{q_c B_1 (k-1)} \right] =$$

$$= \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \left\{ \operatorname{sh} \left[\frac{sC_1}{q_c B_1 (k-1)} \right] \operatorname{ch} (Q \cos \tau) - \right. \\ \left. - \operatorname{ch} \left[\frac{sC_2}{q_c B_1 (k-1)} \right] \operatorname{sh} (Q \cos \tau) \right\}; \\ i_{a2} w_a - I_n w_n = \\ = \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \left\{ \operatorname{sh} \left[\frac{sC_2}{q_c B_1 (k-1)} \right] \operatorname{ch} (Q \cos \tau) - \right. \\ \left. - \operatorname{ch} \left[\frac{sC_1}{q_c B_1 (k-1)} \right] \operatorname{sh} (Q \cos \tau) \right\}.$$

Из условия равенства нулю постоянной составляющей токов i_{a1} и i_{a2} получаем:

$$\operatorname{sh} \left[\frac{sC_1}{q_c B_1 (k-1)} \right] = -\operatorname{sh} \left[\frac{sC_2}{q_c B_1 (k-1)} \right] = \\ = \frac{I_n w_n}{AW_1} \frac{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}{I_0(Q)}$$

и $C_1 = -C_2 = C$.

Так как через магнитопровод, с которым связана подпитывающая обмотка, проходит поток $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = C_1 - \frac{U_{\max}}{\omega w_a} \cos \tau - C_2 + \frac{U_{\max}}{\omega w_a} \cos \tau = 2C$, то ясно, что при принятых допущениях поток, сцепленный с подпитывающей обмоткой, в случае параллельного соединения обмоток переменного тока не меняется со временем. Следовательно, воздействие на обмотку постоянного тока от цепи переменного тока в этом случае не будет иметь места.

Переменный ток, текущий во внешней цепи, будет определяться суммой ампервитков обмоток, расположенных на различных сердечниках. Таким образом,

$$i_a w_a = (i_{a1} + i_{a2}) w_a = \\ = -2 \operatorname{ch} \left[\frac{sC}{(k-1) q_c B_1} \right] \operatorname{sh} Q \cos \tau = \\ = -\frac{2AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \sqrt{1 + \left[\frac{I_n w_n \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}{AW_1 I_0(Q)} \right]^2} \operatorname{sh} (Q \cos \tau).$$

(21)

Отсюда следует, что ток внешней цепи будет содержать в себе гармонические составляющие только нечетных порядков. Гармонические составляющие четных порядков будут складываться между собой, и параллельно соеди-

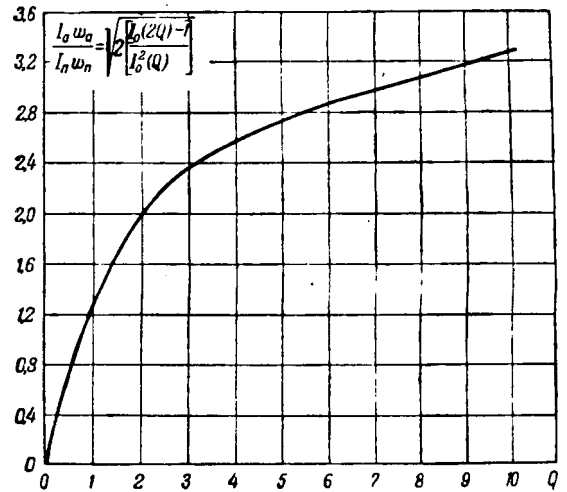


Рис. 3.

ненные обмотки будут представлять для этих составляющих короткозамкнутый контур. Эффективное значение тока во внешней цепи

$$I_a w_a = \\ = \sqrt{2 \left\{ \left[\frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \right]^2 + \left[\frac{I_n w_n}{I_0(Q)} \right]^2 \right\} [I_0(2Q) - 1]} \quad (22)$$

При малых значениях начального тока, когда им можно пренебречь по сравнению с величиной тока при наличии подпитки, соотношение (22) может быть представлено в виде:

$$I_a w_a \approx \frac{\sqrt{2} I_n w_n}{I_0(Q)} \sqrt{I_0(2Q) - 1}. \quad (23)$$

Зависимость $\frac{I_a w_a}{I_n w_n} = f(Q)$ представлена на рис. 3.

Величина тока, протекающего через обмотку, будет больше тока внешней цепи, за счет наличия в кривой тока в обмотках четных гармонических составляющих.

Ранее было получено [уравнение (12)] значение тока в одной обмотке. Отношение тока внешней цепи к току в обмотках назовем коэффициентом использования дросселя.

$$\gamma = \sqrt{\frac{I_0(2Q) - 1}{2[I_0(2Q) - I_0^2(Q)]}}. \quad (24)$$

При наличии нагрузки ток во внешней цепи, т. е. в нагрузке, также не будет содержать в себе гармонических составляющих четных порядков. Поэтому при вычислениях значения γ в расчет следует принимать только нечетные гармонические составляющие. Семейство кривых, представляющих зависимость коэффициента мощности γ , в функции Q и p , построенных по табл. 3 на основании уравнений (18) и (20) с учетом только нечетных гармонических составляющих, приведены на рис. 4.

Таблица 3

Значения γ				
Q	2	4	6	8
$p = 0,2$	0,262	0,322	0,372	0,412
$p = 0,4$	0,534	0,645	0,712	0,75
$p = 0,6$	0,686	0,833	0,882	0,91
$p = 0,8$	0,794	0,916	0,944	0,962
$p = 1,0$	0,872	0,945	0,972	0,976

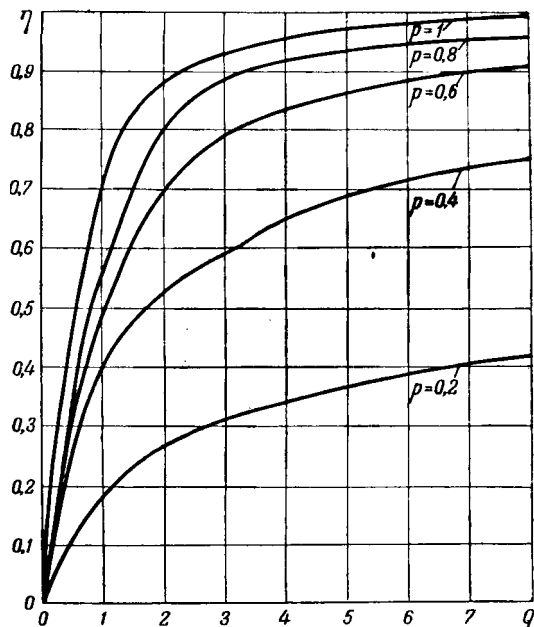


Рис. 4.

Коэффициент использования обмоток при нагрузке находим, взяв корень квадратный из отношения суммы квадратов только нечетных гармонических составляющих к сумме квадратов всех гармонических составляющих. Значения γ в функции Q и p приведены на кривых рис. 5, которые построены по табл. 4. Ясно, что $p=0$ соответствует режиму работы дросселя при отсутствии нагрузки.

Таблица 4

Значения γ				
Q	2	4	6	8
$p=0$	0,92	0,843	0,813	0,79
$p=0,2$	0,937	0,885	0,861	0,854
$p=0,4$	0,95	0,917	0,913	0,91
$p=0,6$	0,97	0,965	0,963	0,961
$p=0,8$	0,98	0,973	0,97	0,969
$p=1,0$	0,992	0,985	0,977	0,76

Такое определение коэффициента использования при нагрузке не вполне строго, так как для четных гармонических электрическая цепь иная, чем для нечетных, и не содержит в себе сопротивления нагрузки, но это различие компенсируется тем, что величина приложенного к дросселю напряжения уменьшается с увеличением тока, что до некоторой степени эквивалентно наличию в цепи сопротивления нагрузки. Ошибка, получающаяся при таком допущении, не превышает величины, допустимой при подобных расчетах.

В случае последовательного соединения обмоток переменного тока ток в обмотках будет одним и тем же. При принятых допущениях приложенное напряжение будет уравновешиваться суммой мгновенных значений, индуктированных в каждой из обмоток э. д. с. Уравнение электрического равновесия в цепи переменного тока примет вид:

$$i_a \omega_a \left(\frac{d\Phi_1}{d\tau} + \frac{d\Phi_2}{d\tau} \right) = U_{\max} \sin \tau \text{ и } \Phi_1 + \Phi_2 = C_1 - \frac{U_{\max} \cos \tau}{\omega_a}.$$

Уравнения магнитного равновесия

$$i_a \omega_a + I_n \omega_n = \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \operatorname{sh} \left[\frac{s\Phi_1}{q_c B_1 (k-1)} \right];$$

$$i_a \omega_a - I_n \omega_n = \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \operatorname{sh} \left[\frac{s\Phi_2}{q_c B_1 (k-1)} \right].$$

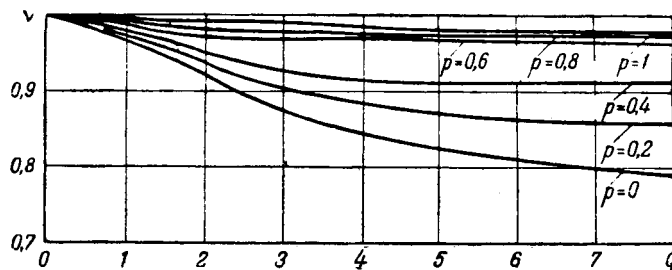


Рис. 5.

Вычитая нижнее уравнение из верхнего, получаем:

$$I_n \omega_n = \frac{AW_1}{2 \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \left\{ \operatorname{sh} \left[\frac{s\Phi_1}{q_c B_1 (k-1)} \right] - \operatorname{sh} \left[\frac{s\Phi_2}{q_c B_1 (k-1)} \right] \right\} =$$

$$= \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \operatorname{sh} \left[\frac{s(\Phi_1 - \Phi_2)}{2q_c B_1 (k-1)} \right] \operatorname{ch} \left[\frac{s(\Phi_1 + \Phi_2)}{2q_c B_1 (k-1)} \right] =$$

$$= \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \operatorname{ch} \left[\frac{sC}{2q_c B_1 (k-1)} - \frac{Q \cos \tau}{2} \right] \operatorname{sh} \left[\frac{s(\Phi_1 - \Phi_2)}{2q_c B_1 (k-1)} \right].$$

Отсюда следует, что ток в подпитывающей обмотке всегда будет содержать в себе переменную составляющую, т. е. даже при отсутствии рассеяния будет иметь место воздействие цепи переменного тока на цепь постоянного. Не говоря уже о возникающих при этом дополнительных потерях в цепи подпитывающей обмотки, такое воздействие чрезвычайно не желательно в системах регулирования, где чаще всего применяются дроссели насыщения, так как оно приводит к дополнительным искажениям регулирующих воздействий при прохождении через цепь регулирования. При искусственном увеличении сопротивления для переменной составляющей тока в контуре подпитывающей обмотки в ней могут возникать недопустимые перенапряжения. Поэтому в обычных схемах применения дросселей насыщения последовательное соединение обмоток переменного тока не применяется.

До сих пор мы считали, что весь поток, создаваемый ампервитками постоянного и переменного токов, замыкается через железный сердечник. В действительности, некоторая часть потока замыкается через воздух и не участвует в насыщении магнитной системы, снижая тем самым степень эффективности работы дросселя насыщения. Количественные методы исследования картины распределения потоков в дросселе представляет собой чрезвычайно сложную задачу. В дросселе насыщения величина индукции достигает таких значений, при которых проницаемость железа становится соизмеримой с проницаемостью воздуха. Кроме того, здесь одна из обмоток обтекается несинусоидальным переменным током, вторая — постоянным; величина магнитной проницаемости резко меняется в течение периода. Взаимное расположение обмоток таково, что взаимодействие между полями меняется по длине витка. Поэтому обычные методы, применяющиеся для определения потоков рассеяния, для данного случая неприменимы. Разработка специальных аналитических методов, пригодных для определения распределения потоков в дросселе насыщения, представляет собой самостоятельную задачу.

В настоящей работе мы ограничимся рассмотрением качественной стороны явлений, связанных с действительным распределением магнитных полей в системе. Для получения необходимых количественных соотношений воспользуемся результатами проведенных опытов. Надо полагать, что полученные таким образом результаты могут быть распространены на дроссели с аналогичными конструктивными соотношениями и удельными нагрузками, вне зависимости от

мощностей и абсолютных размеров. Поток, сцепленный с каждой из обмоток переменного тока, можно рассматривать в виде суммы двух составляющих: потока, проходящего через железный сердечник, и потока рассеяния, замыкающегося через воздушный промежуток. Закон изменения во времени потока рассеяния подобен изменению тока в обмотке и отличается от него наличием некоторой постоянной составляющей. Суммарный поток остается синусоидальным, так как действие его уравнивает приложенное синусоидальное напряжение сети (активные потери в цепи здесь мы не рассматриваем). Следовательно, основной поток, замыкающийся через железный сердечник и представляющий собой разность полного синусоидального потока и потока рассеяния, будет несинусоидальным и содержать те же гармонические составляющие, что и ток в каждой обмотке. Поэтому в подпитывающей обмотке даже при синусоидальном приложенном напряжении и при параллельном соединении обмоток переменного тока будет индуцироваться некоторая э. д. с. Основные гармонические составляющие потоков, сцепленных с каждой из обмоток переменного тока, будут вычитаться; в магнитопроводе, с которым связана подпитывающая обмотка, четные гармонические составляющие будут складываться. Это приведет к появлению в подпитывающей обмотке дополнительного тока с гармоническими составляющими четных порядков относительно основной частоты сети. Потоки от этих токов, взаимодействуя с основным потоком, уменьшат четные гармонические составляющие основного потока, а это в свою очередь приведет к некоторому снижению четных составляющих в токе, протекающем через каждую из обмоток переменного тока. Следовательно, наличие потоков рассеяния, пропорциональных току, вызовет некоторое увеличение коэффициента использования обмотки переменного тока за счет появления дополнительных токов в подпитывающей обмотке.

При наличии активного сопротивления нагрузки, как это было показано ранее, форма кривой переменного тока, забираемого из сети, не будет содержать в себе четных гармонических составляющих. Поэтому суммарное кажущееся сопротивление дросселя не будет зависеть от распределения между обмотками токов, содержащих составляющие четных порядков. Нечетные составляющие потоков не будут воздействовать на цепь подпитывающей обмотки, так как действие этих потоков от двух обмоток переменного тока взаимно уравнивается. Поэтому форма кривой тока, забираемого из сети, не будет зависеть от распределения потоков. Абсолютная величина тока изменится, главным образом, из-за наличия в потоке рассеяния постоянной составляющей, что приводит к уменьшению постоянной составляющей основного потока. Уменьшение постоянной составляющей потока по своему действию эквивалентно снижению числа действующих ампервитков подпитки. Назовем отношение действующих ампер-

витков к полному числу ампервитков коэффициентом рассеяния дросселя и обозначим его ε . Действующее число ампервитков подпитки представляет собой разность их полного числа и ампервитков, которые создают постоянные составляющие потоков, замыкающихся через воздушный промежуток. Такое определение коэффициента рассеяния существенно отличается от обычного толкования этого термина, но в данном случае оно удобно, так как отражает физическую природу явления, определяющего значение коэффициента ε . Величина ε является функцией конструктивных соотношений в дросселе и некоторого, усредненного за период, значения магнитной проницаемости. Ввиду того что при холостом ходе дросселя, как это было показано ранее, эффективное значение переменного тока можно считать линейно зависящим от ампервитков подпитки, величина ε для дросселя будет зависеть только от относительного значения индукции, т. е. ε будет представлять собой функцию Q . При этом величина ε будет уменьшаться с увеличением Q . Однако, если значение ε выбрать для какого-то среднего в диапазоне нормально применяющихся величин Q и затем считать это значение постоянным, то ошибка при значениях Q , отличных от того, при котором определялась ε , будет сравнительно небольшой, во всяком случае допустимой при проектировании дросселя насыщения. Это положение подтверждается приведенными здесь результатами проведенных экспериментов. Таким образом, расчет эффективного значения тока, забираемого из сети, при параллельном соединении обмоток дросселя и при отсутствии нагрузки следует проводить, пользуясь соотношением

$$I_a w_a = \sqrt{2 \left[\left(\frac{A W_1}{\text{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \right)^2 + \left(\frac{\partial I_n w_n}{I_0(Q)} \right)^2 \right] [I_0(2Q) - 1]} \quad (25)$$

Здесь w_a — число витков одной обмотки.

При работе дросселя с активной нагрузкой значение η на кривых рис. 4 следует определять, исходя из величины ε .

Экспериментальная проверка изложенных здесь методов расчета производилась для трехстержневого дросселя, размеры которого приведены на рис. 6, с числом витков в каждой из обмоток переменного тока $w_a = 156$ и числом витков в подпитывающей обмотке $w_n = 8700$.

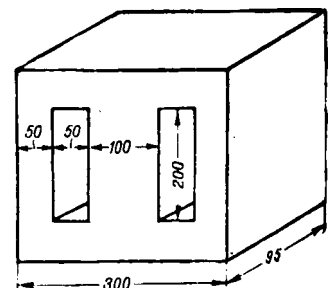


Рис. 6.

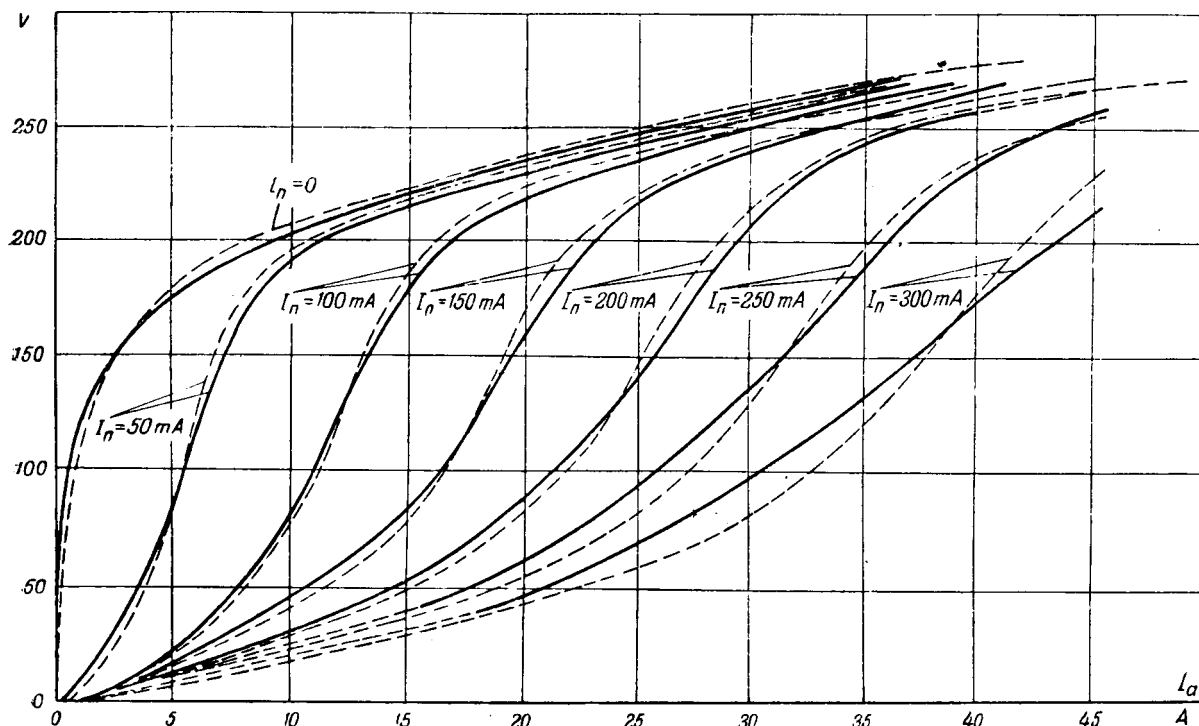


Рис. 7.

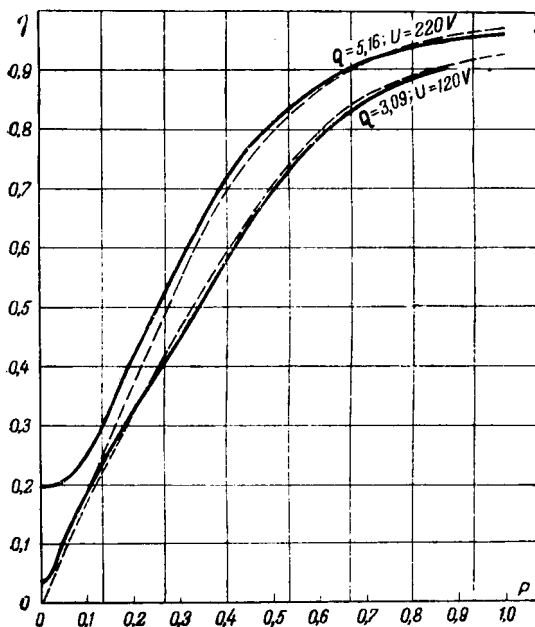


Рис. 8

вых позволяет сделать вывод, что при данных условиях расчет характеристик дросселя изложенным методом приводит к достаточно точным результатам.

Полученный в результате опытов коэффициент рассеяния может быть применен для всех дросселей с аналогичными конструктивными соотношениями. Увеличение отношения высоты окна к ширине, например до 6, приводит к увеличению коэффициента рассеяния до величины примерно $\sigma = 0,92$.

Приведенные методы расчета характеристик дают возможность при применении дросселей в условиях, близких к рассматриваемым, разработать рациональные методы проектирования дросселей насыщения по заданным техническим условиям.

Определим вес меди дросселя, исходя из величины отдаваемой активной мощности $P_{нагр}$ и заданного коэффициента усиления λ . По определению

$$\lambda = \frac{P_{нагр}}{P_n} = \frac{P_{нагр} \gamma_n^2}{2,5 G_n j_n^2}.$$

Коэффициент использования подпитывающей обмотки γ_n можно приблизительно принять равным $\sqrt{\gamma}$. Отсюда вес меди подпитывающей обмотки

$$G_n = \frac{P_{нагр} \gamma}{2,5 j_n^2 \lambda}.$$

Вес меди обмотки переменного тока G_a можно определить, задавшись некоторыми конструктивными соотношениями, через вес меди подпитывающей обмотки и параметр ρ .

Действительно,

$$\rho = \frac{I_n w_n R}{U w_a} = \frac{I_n w_n}{\sqrt{2} I_a w_a} \gamma,$$

Дроссель был изготовлен из трансформаторной стали. На кривых рис. 7 и 8 приведены результаты опытов (сплошные кривые) и соответствующие им расчетные кривые (пунктирные линии) соответственно для характеристик холостого хода (рис. 7) и активной нагрузки (рис. 8). При этом коэффициент рассеяния был принят равным $\sigma = 0,88$, что соответствует совпадению расчетных и экспериментальных кривых для точки $U = 120$ V или $Q = 3,09$ и $I_n = 150$ mA на рис. 7. Сравнение экспериментальных и расчетных кривых

но

$$\frac{l_n w_n}{l_a w_a} = \frac{2G_n l_a j_n}{G_a l_h j_a}$$

здесь l_n и l_a — средние длины витков соответственно подпитывающей обмотки и обмотки переменного тока; j с соответствующими индексами — значения плотности тока.

Отношение $\frac{l_a}{l_n}$ определяется конструктивными особенностями. Коэффициент 2 появляется вследствие того, что в выражение входят ампервитки только одной обмотки переменного тока. Полагая $j_n = j_a = j$ и вводя коэффициент рассеяния σ , получаем, что общий вес меди

$$G_{\mu} = G_n \left(1 + \frac{\sqrt{2} \sigma \eta}{\rho} \frac{l_a}{l_n} \right) = \frac{P_{назр}}{2,5 j^2 k} \left(1 + \frac{\sqrt{2} \sigma \eta}{\rho} \frac{l_a}{l_n} \right). \quad (26)$$

Вес активной части стального сердечника, через который замыкается основной переменный ток, определяется из нижеследующих соотношений. Ранее было выведено, что

$$I_0 w_a = \frac{AW_1 \sqrt{2}}{\text{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \sqrt{I_0 (2Q) - 1}$$

отсюда

$$w_a = \frac{AW_1 l_c \sqrt{2}}{I_0 \text{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \sqrt{I_0 (2Q) - 1}$$

(l_c — средняя длина силовой линии). Подставляя это значение w_a в уравнение для $Q = \frac{sU}{\omega w_a B_1 q_c (k-1)}$, получаем, что объем активной стали

$$q_c l_c = \frac{U I_0 \text{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}{\omega AW_1 B_1 Q \sqrt{2} \sqrt{I_0 (2Q) - 1}} \left(\frac{s}{k-1} \right)$$

и вес стали

$$G_c = \frac{P_{\mu} \left(\frac{s}{k-1} \right) \text{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right) 7,8 \cdot 10^{-3}}{\omega AW_1 B_1 Q \sqrt{I_0 (2Q) - 1}}, \quad (27)$$

здесь $P_{\mu} = \frac{U_{\max} I_0}{\sqrt{2}}$ — начальная реактивная мощность, потребляемая в дросселе.

В выражениях (26) и (27) неопределенным остается значение Q , которое при заданном η однозначно определяет собой величины ρ и γ . Выбор Q будем производить, исходя из следующих соображений.

Всякую силовую электрическую установку следует проектировать таким образом, чтобы потери в ней при всех нормальных режимах работы оставались примерно постоянными. При эксплуатации дросселя насыщения режим его работы меняется от режима, соответствующего отсутствию тока в подпитывающей обмотке, до режима полного подмагничивания, соответствующего заданному коэффициенту мощности. В первом режиме при обычно имеющем место сравнительно малом значении начального тока и максимальном приложенном напряжении можно считать, что потери в меди ничтожно малы по сравнению с потерями в железе. Во втором режиме к обмотке дросселя оказывается приложенной только небольшая часть напряжения сети, так как основная часть напряжения па-

дает в нагрузке. При этом токи в обеих обмотках максимальны, так что здесь потери в меди являются основными, определяющими общие потери в дросселе. Очевидно, что при всех промежуточных режимах суммарные потери в дросселе будут претерпевать наименьшие изменения, если спроектировать дроссель таким образом, чтобы потери в стали при отсутствии подпитки были равны потерям в меди при максимальной подпитке.

Потери в стали можно представить в виде:

$$P_c = K \left(\frac{B_{\max}}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_c,$$

где K — коэффициент, зависящий от типа магнитного материала. Потери в меди при равных плотностях токов в обмотках переменного и постоянного токов

$$P_{\mu} = \frac{2,5 G_{\mu} j^2}{\gamma}.$$

Считая P_c и P_{μ} , имеем:

$$\frac{B_{\max}}{10\,000} = \left(\frac{j}{50} \right)^{0,65} \sqrt{\frac{2,5}{K}} \sqrt{\frac{G_{\mu}}{G_c}}$$

или, переходя к безразмерному параметру $Q = \frac{B_{\max} s}{B_1 (k-1)}$,

$$Q = \frac{10\,000}{B_1} \frac{s}{k-1} \left(\frac{j}{50} \right)^{0,65} \sqrt{\frac{2,5}{K}} \sqrt{\frac{G_{\mu}}{G_c}}. \quad (28)$$

Подставляя сюда значения G_{μ} и G_c из (26) и (27), получаем соотношение для определения рационального значения Q :

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{I_0 (2Q) - 1}}{Q} &= \\ &= \frac{\lambda}{\mu} \frac{\text{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}{\left(\frac{s}{k-1} \right)} \frac{\left(\frac{j}{50} \right)^{1,3}}{\left(1 + \frac{\sqrt{2} \sigma \eta}{\rho} \frac{l_a}{l_n} \right)} \frac{B_1 k}{\omega AW_1} \times \\ &\quad \times 7,8 \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (29)$$

При $f = 50$ Hz, взяв для предварительного расчета $G_a = G_n$, для трансформаторной стали с $B_1 = 10\,000$; $AW_1 = 1,8$; $s = 2,31$; $k = 1,45$; $K = 2,3$, имеем:

$$\frac{\sqrt{I_0 (2Q) - 1}}{Q} = 0,25 \frac{\lambda}{\mu}.$$

Для удобства проведения необходимых расчетов по формуле (29) значения $\frac{\sqrt{I_0 (2Q) - 1}}{Q} = f(Q)$ приведены в табл. 5. Например, при $\lambda = 100$ и $\frac{1}{\mu} = 0,1$ $Q = 2,8$. Таким

образом, по заданным условиям получаются все основные величины, необходимые для проектирования. Дальнейший ход проектирования сводится к решению обычной конструктивной задачи, ничем, по существу, не отличающейся от проектирования обычного трансформатора.

Таблица 5

Q	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{\sqrt{I_0 (2Q) - 1}}{Q}$	1,13	1,605	2,717	5,13	10,5	22,8	51,2	118

Приложение 1

Для определения коэффициентов, входящих в приближенное уравнение кривой намагничивания имеем два уравнения:

$$AW_1 = \alpha \operatorname{sh} \beta B_1; \quad AW_2 = \alpha \operatorname{sh} \beta B_2.$$

Отсюда получаем, что $\frac{AW_2}{AW_1} = \frac{\operatorname{sh} \beta B_2}{\operatorname{sh} \beta B_1}$. В области реальных значений интересующих нас величин с достаточной для практических расчетов точностью можно считать, что

$$\frac{\operatorname{sh} \beta B_2}{\operatorname{sh} \beta B_1} \approx e^{\beta(B_2 - B_1)} \quad \text{или} \quad \beta = \frac{\ln \left(\frac{AW_2}{AW_1} \right)}{B_2 - B_1}.$$

Ясно, что $\alpha = \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \beta B_1}$. Далее имеем,

$$\begin{aligned} AW &= AW_1 \frac{\operatorname{sh} \beta B}{\operatorname{sh} \beta B_1} = \\ &= AW_1 \frac{e^{\frac{B}{B_2 - B_1} \cdot \ln \left(\frac{AW_2}{AW_1} \right)} - e^{-\frac{B}{B_2 - B_1} \cdot \ln \left(\frac{AW_2}{AW_1} \right)}}{e^{\frac{B_1}{B_2 - B_1} \cdot \ln \left(\frac{AW_2}{AW_1} \right)} - e^{-\frac{B_1}{B_2 - B_1} \cdot \ln \left(\frac{AW_2}{AW_1} \right)}}. \end{aligned}$$

Обозначив $\frac{B_2}{B_1} = k$ и $\frac{AW_2}{AW_1} = e^s$, получим, что

$$AW = AW_1 \frac{\operatorname{sh} \left[\frac{sB}{B_1(k-1)} \right]}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}.$$

Приложение 2

Решение уравнения (3) имеет вид:

$$\Phi = -\frac{U}{\omega w_a} \cos \omega t.$$

Постоянная составляющая потока в рассматриваемом случае отсутствует и, следовательно, постоянная интегрирования равна нулю.

Подставляя найденное значение потока в уравнение (4), получим:

$$i_0 w_a = -\frac{AW_1 \operatorname{sh} \left[\frac{s U_{\max} \cos \omega t}{\omega w_a (k-1) q_c B_1} \right]}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}.$$

Обозначим: $\frac{s U_{\max}}{\omega w_a (k-1) q_c B_1} = Q$, где Q — безразмерная величина, которую можно представить в виде $Q = \frac{s B_{\max}}{(k-1) B_1}$, где $B_{\max} = \frac{U_{\max}}{\omega w_a q_c}$ соответствует максимальному значению индукции при данном приложенном напряжении.

Теперь

$$i_a w_a = -\frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \operatorname{sh} (Q \cos \omega t).$$

Это выражение представим в виде гармонического ряда, для чего воспользуемся известным разложением по функциям Бесселя:

$$\begin{aligned} e^{Q \cos \omega t} &= I_0(Q) + 2I_1(Q) \cos \omega t + 2I_2(Q) \cos 2\omega t + \dots = \\ &= I_0(Q) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} I_n(Q) \cos n \omega t, \end{aligned}$$

здесь $I_n(Q)$ — функция Бесселя n -ного порядка от чисто мнимого аргумента. Тогда выражение для начального тока будет:

$$\begin{aligned} i_0 w_a = -\frac{2AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} [I_1(Q) \cos \omega t + I_3(Q) \cos 3\omega t + \\ + I_5(Q) \cos 5\omega t + \dots]. \end{aligned}$$

Эффективное значение тока i_0

$$\begin{aligned} i_0 &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_0^2 d\omega t} = \\ &= \frac{AW_1}{w_a \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\operatorname{ch}(2Q \cos \omega t) - 1}{2} d\omega t} = \\ &= \frac{AW_1}{\sqrt{2} w_a \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \sqrt{I_0(2Q) - 1}. \end{aligned}$$

Приложение 3

Из уравнений (7) и (8) имеем:

$$\begin{aligned} i_a w_a + I_n w_n &= \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \operatorname{sh} \left[\frac{sC}{(k-1)q_c B_1} - Q \cos \omega t \right] = \\ &= \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \left\{ \operatorname{sh} \left[\frac{sC}{(k-1)q_c B_1} \right] \operatorname{ch}(Q \cos \omega t) - \right. \\ &\quad \left. - \operatorname{ch} \left[\frac{sC}{(k-1)q_c B_1} \right] \operatorname{sh}(Q \cos \omega t) \right\} = \\ &= \frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \left\{ \operatorname{sh} \left[\frac{sC}{(k-1)q_c B_1} \right] \cdot [I_0(Q) + 2I_2(Q) \cos 2\omega t + \right. \\ &\quad \left. + 2I_4(Q) \cos 4\omega t + \dots] - 2 \operatorname{ch} \left[\frac{sC}{(k-1)q_c B_1} \right] \cdot [I_1(Q) \cos \omega t + \right. \\ &\quad \left. + I_3(Q) \cos 3\omega t + I_5(Q) \cos 5\omega t + \dots] \right\}; \end{aligned}$$

приравнявая постоянные составляющие в левой и правой частях этого уравнения, находим, что $\operatorname{sh} \left[\frac{sC}{(k-1)q_c B_1} \right] =$

$$\frac{I_n w_n \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}{AW_1 I_0(Q)},$$

тогда

$$\operatorname{ch} \left[\frac{sC}{(k-1)q_c B_1} \right] = \sqrt{1 + \left[\frac{I_n w_n \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}{AW_1 I_0(Q)} \right]^2}.$$

далее

$$\begin{aligned} i_a w_a &= \frac{2I_n w_n}{I_0(Q)} [I_2(Q) \cos 2\omega t + I_4(Q) \cos 4\omega t + \dots] - \\ &- 2 \sqrt{\left[\frac{AW_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \right]^2 + \left[\frac{I_n w_n}{I_0(Q)} \right]^2} [I_1(Q) \cos \omega t + \\ &\quad + I_3(Q) \cos 3\omega t + \dots]. \end{aligned}$$

Отсюда эффективное значение ампервитков переменного тока

$$I_a w_a = \sqrt{2 \left[\frac{I_n w_n}{I_0(Q)} \right]^2 \sum_1^{\infty} I_n^2(Q) + 2 \left[\frac{A W_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \right]^2 \sum_1^{\infty} I_{2n-1}^2(Q)}.$$

Второе слагаемое в правой части, как легко видеть, представляет собой начальные ампервитки.

Действительно, так как

$$2 \sum_1^{\infty} I_{2n-1}(Q) \cos [(2n-1) \omega t] = \operatorname{sh}(Q \cos \omega t),$$

а

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \operatorname{sh}^2(Q \cos \omega t) d\omega t = \frac{I_0(2Q)-1}{2},$$

то

$$2 \sum_1^{\infty} I_{2n-1}^2(Q) = \frac{I_0(2Q)-1}{2}.$$

Сопоставляя последнее соотношение с уравнением (6), получим:

$$2 \left[\frac{A W_1}{\operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} \right]^2 \sum_1^{\infty} I_{2n-1}^2(Q) = (I_0 w_a)^2.$$

Из теоремы сложения функций Бесселя имеем:

$$2 \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2(Q) = I_0(2Q) - I_0^2(Q);$$

следовательно,

$$I_a w_a = \sqrt{(I_0 w_a)^2 + (I_n w_n)^2 \left[\frac{I_0(2Q)}{I_0^2(Q)} - 1 \right]}.$$

Для случая работы дросселя на омическое сопротивление было получено, что для стационарного режима, соответствующего периодическому решению уравнения (16),

$$Z = \frac{e^{Q(p\tau - \cos \tau)}}{Q \varepsilon \int e^{Q(p\tau - \cos \tau)} d\tau}.$$

При принятых допущениях на основании ранее приведенных соотношений, имеем:

$$\begin{aligned} i_a w_a &= \frac{A W_1}{2 \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)} z - I_n w_n; \\ z &= \frac{2 \operatorname{sh} \left(\frac{s}{k-1} \right)}{A W_1} (i_a w_a + I_n w_n) = \\ &= \frac{R}{\varepsilon U w_a} (i_a w_a + I_n w_n). \end{aligned}$$

Обозначим через $i = \frac{i_a R}{U_{\max}}$ относительное значение тока,

которое представляет собой частное от деления мгновенного значения тока, протекающего через рассматриваемую цепь, на амплитудное значение тока, проходящего через сопротивление нагрузки при коротком замыкании дросселя.

Тогда $z = \frac{i+p}{\varepsilon}$ и

$$i = \varepsilon z - p = \frac{e^{Q(p\tau - \cos \tau)}}{Q \int e^{Q(p\tau - \cos \tau)} d\tau} - p;$$

представляла подинтегральную функцию в виде гармонического ряда, в результате интегрирования получим:

$$i = p \left[\frac{e^{-Q \cos \tau}}{I_0(Q) + 2 \sum_1^{\infty} (-1)^n \frac{I_n(Q) p Q}{n^2 + (pQ)^2} (n \sin n\tau + pQ \cos n\tau)} - 1 \right].$$

◇ ◇ ◇

Бесконтактный быстродействующий регулятор тока

Доктор техн. наук, проф. И. Л. КАГАНОВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Принципиальная схема предложенного регулятора приведена на рис. 1. Измерительным и одновременно усилительным элементом служит дроссель насыщения, через окно в магнитной системе D которого пропускается отрезок шины $Ш$, несущей регулируемый постоянный ток I_d . При меньших значениях регулируемого тока может быть пропущен через катушку из нескольких витков, охватывающих магнитопровод дросселя D .

Постоянный магнитный поток, создаваемый в дросселе рабочим током I_d , компенсируется ампервитками катушки w_k , питаемой от вспомогательного источника постоянного напряжения U_k . Отступление рабочего тока от значения, задаваемого ампервитками $i_k w_k$ компенсирующего тока i_k , вызывает подмагничивание дросселя постоянным потоком. Это меняет индуктивное сопротивление исполнительной катушки w_p , включенной последовательно с выпрямительным мостом B в цепь вспомогательного источника переменного напряжения U_p . В результате меняются токи на входе $i_{p\sim}$ и выходе i_p выпрямительного моста.

Отступление значения рабочего тока от заданного вызывает, таким образом, соответствующее изменение тока на выходе регулятора, связанного с исполнительным органом системы. Последний должен вернуть рабочий ток I_d возможно ближе к исходному.

Описан новый тип регулятора, отличающийся простотой устройства и обслуживания при достаточно высокой чувствительности, скорости действия и стабильностью характеристик.

Первая характерная особенность разработанного типа регулятора заключается в том, что

здесь усилительные свойства дросселя насыщения сочетаются с принципом магнитной компенсации при непосредственном введении шинпровода регулируемого тока в магнитную систему дросселя.

Изображенная на рис. 1 магнитная система дросселя обладает, однако, одним существенным недостатком, заключающемся в том, что катушка постоянного тока охватывается переменным потоком, в силу чего в ней наводится переменная э. д. с. Чтобы избежать этого, магнитная система дросселя фактически исполнена, как видно на рис. 2, с четырьмя сердечниками. Левый сердечник несет компенсационную катушку, два средних сердечника — две антипараллельно включенные исполнительные катушки переменного тока w_{p1} и w_{p2} , а правый сердечник — без обмотки, выполняет роль магнитного шунта.

При таком расположении исполнительных катушек переменный поток замыкается только по контуру двух внутренних сердечников, не заходя в крайние сердечники. Между тем, постоянный магнитный поток из левого сердечника разветвляется по двум средним сердечникам, а после их полного насыщения избыток потока переходит в магнитный шунт, содержащий воздушный зазор. Постоянный магнитный поток меняет индуцированную э. д. с. в исполнитель-

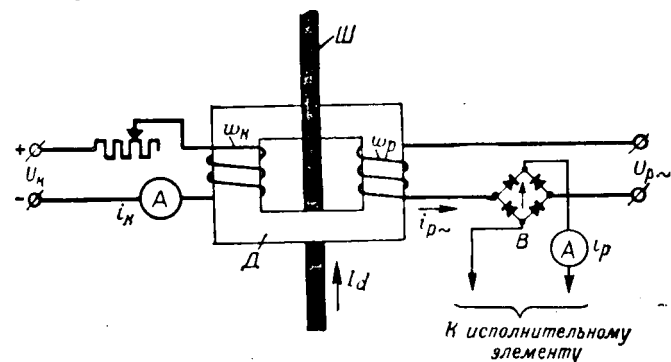


Рис. 1. Принципиальная схема регулятора.

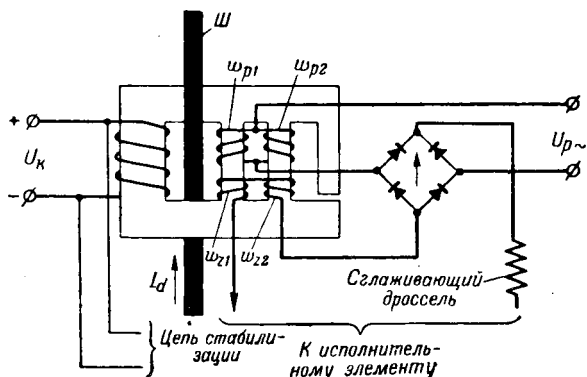


Рис. 2. Рабочая схема регулятора.

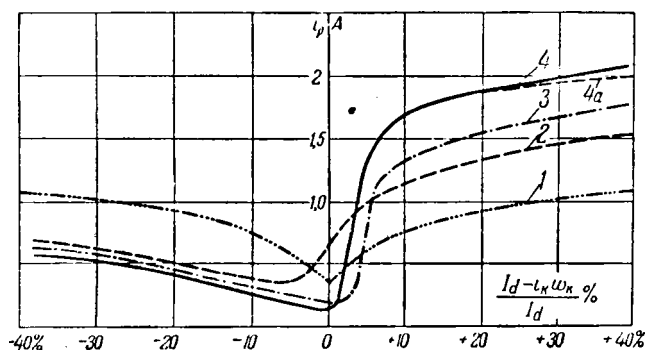


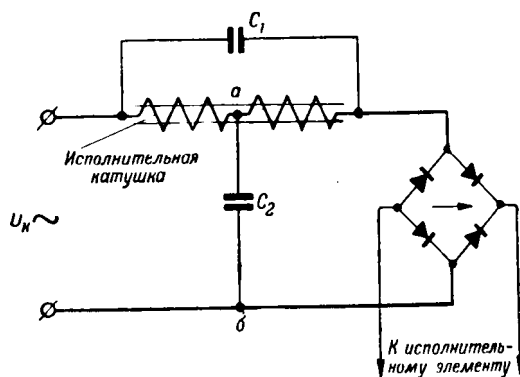
Рис. 3. Характеристики регулятора.

ных катушках одинаково, но со сдвигом в 180 электрических градусов. Ток в выходном узле катушек, являющийся суммой токов обеих катушек, получается при этом вполне симметричным.

При отсутствии на средних сердечниках дросселя других обмоток, кроме исполнительных, характеристика регулирования определяется кривой 1 (рис. 3). Здесь по оси абсцисс отложена разность ампервитков рабочего тока и тока компенсации в процентах от ампервитков при номинальном токе (в нашем случае последний ток выпрямительного моста i_p , являющийся исполнительным током регулятора. Кривая 1 не пригодна ни по своей крутизне, определяющей чувствительность регулятора, ни в силу симметрии ее ветвей. Симметрия ветвей характеристики неприемлема для устройств, подобных выпрямительному, когда требуется обеспечить однозначное изменение тока и угла регулирования. Однозначное регулирование с одновременным резким повышением чувствительности регулятора достигнуто введением в контур подмагничивания обратной связи. Катушки обратной связи w_{z1} и w_{z2} питаемые выходным током, насажены на те же сердечники регулятора, что и исполнительные катушки (рис. 2).

При наличии обратной связи характеристика регулятора определяется кривой 2 (рис. 3). Крутизна правой ветви характеристики здесь заметно повысилась, в то время как крутизна левой ветви резко снизилась. При увеличении числа витков обратной связи можно добиться еще большего повышения крутизны правой ветви.

Слишком большое, однако, увеличение положительной обратной связи недопустимо, так как приводит к трудно погашаемым автоколебаниям в системе. Дальнейшее усиление чувствительности и увеличение диапазона регулирования при меньшем влиянии на развитие автоколебаний было достигнуто введением в схему, как показано на рис. 4, двух конденсаторов C_1 и C_2 . Конденсатор C_1 , включенный параллельно рабочей обмотке, повышает крутизну правой ветви характеристики, благодаря тому, что емкостный ток конденсатора компенсирует основную волну тока

Рис. 4. Схема включения конденсаторов C_1 и C_2 для улучшения характеристик регулятора.

холостого хода реактора, что снижает общий минимум исполнительного тока, устанавливающийся при равенстве ампервитков рабочего тока и тока компенсации, а при больших значениях этой разности емкостный ток конденсатора возрастает из-за роста высших гармонических в исполнительном токе при переходе к участку насыщения. Конденсатор C_2 , включенный между средней точкой исполнительных обмоток (точка а) и другим полюсом источника питания (точка б), увеличивает исполнительный ток благодаря возрастанию напряжения на точках а и б из-за емкостного тока, проходящего через индуктивность одной половины исполнительных катушек. Изменение характеристики, вызываемое конденсатором C_1 при наличии обратной связи, показывает кривая 3, а изменение характеристики, обусловленное введением двух конденсаторов C_1 и C_2 , — кривая 4 (рис. 3).

Действие магнитного шунта сводится к тому, что наклон характеристики на участке насыщения понижается, и ход характеристики на этом участке определяется, как это показано пунктирным участком кривой 4а (рис. 3).

Конструкция сердечника магнитной системы, своеобразное использование принципа обратной связи и введение специально включенных в схему конденсаторов представляет дальнейшие характерные особенности системы.

Даже умеренное использование положительной обратной связи для повышения чувствительности и создания асимметрии характеристики регулятора привело к необходимости принять специальные меры для обеспечения стабильной работы регулятора, т. е. к предупреждению колебаний при переходе от одного состояния равновесия к другому. Важно не только не допустить развития автоколебаний, возрастающих по амплитуде, но и при затухающих колебаниях иметь значительный декремент их с тем, чтобы переход от одного состояния равновесия к другому проходил при минимальном перерегулировании. После опробования ряда методов оказалось, что достаточной стабилизации в рассматриваемом регуляторе можно добиться путем подведения к исполнительному элементу регулятора тока, изменяю-

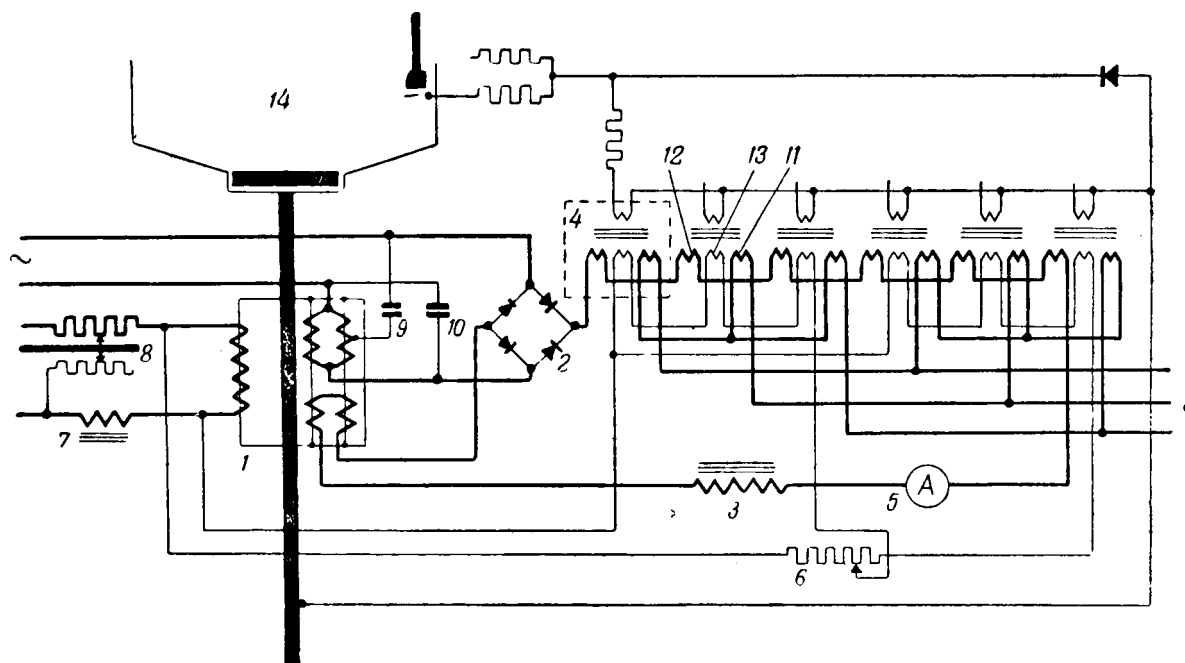


Рис. 5. Электрическая схема включения регулятора для регулирования тока ртутного выпрямителя.

1 — дроссель насыщения; 2 — выпрямительный мост; 3 — сглаживающий дроссель; 4 — пик-трансформатор; 5 — амперметр в цепи исполнительного тока; 6 — активное сопротивление в цепи стабилизации; 7 — дроссель, блокирующий проникновение тока стабилизации в цепь постоянного тока; 8 — реостат установки; 9 — конденсатор C_2 ; 10 — конденсатор C_1 ; 11 — первичная обмотка п.т.; 12 — подмагничивающая обмотка; 13 — стабилизирующая обмотка; 14 — ртутный выпрямитель.

щегося пропорционально производной первого порядка от регулируемого рабочего тока. Такой ток мог бы быть получен от добавочной катушки, насаженной на ту же часть магнитной системы дросселя насыщения, на которой помещена компенсационная обмотка. Чтобы не увеличивать число обмоток на реакторе и одновременно решить вопрос о балансировании тока подмагничивания, на исполнительном элементе (подробнее см. ниже), в качестве обмотки питания цепи стабилизации была использована непосредственно компенсационная обмотка. Ответвление определенной доли постоянного тока в цепь стабилизации было полезно использовано (как это ниже выяснится) для питания цепи исполнительного элемента.

Применение регулятора для регулирования тока ртутных выпрямителей. К потребителям, у которых требуется поддерживать ток на уровне, заданном условиями технологии, в первую очередь относятся установки для электролиза алюминия. Полную автоматизацию процесса в подобных установках удастся получить при использовании регулятора вышеописанного типа, воздействующего на сетки ртутных выпрямителей. Схема включения регулятора в цепь сетевого управления ртутных выпрямителей показана на рис. 5.

Как и в принципиальной схеме, дроссель насыщения насажен здесь непосредственно на шину, отводящую ток от ртутного выпрямителя.

Выходная цепь регулятора замыкается на последовательно включенные между собой обмотки подмагничивания пик-трансформаторов, которые в этой системе выполняют роль исполнительного

элемента. При изменении тока подмагничивания пик-трансформаторов меняется фаза вторичного напряжения их по отношению к фазе первичного напряжения, что приводит к изменению угла сетевого регулирования. Угол регулирования в пределах до $40-50^\circ$ примерно пропорционален току подмагничивания. Поэтому кривая исполнительного тока, представленная на рис. 3, может служить одновременно и характеристикой углов регулирования.

Коэффициент пропорциональности между током и углами зависит от электромагнитных характеристик пик-трансформаторов. В пик-трансформаторах, примененных для сетевого регулирования на преобразовательной подстанции завода, где устанавливались регуляторы, этот коэффициент определен сдвигом в 5 электрических градусов на 0,1 А исполнительного тока. Возможность контролировать угол непосредственно по показаниям магнитоэлектрического амперметра, включенного в цепь исполнительного тока, является еще одним существенным для эксплуатации преимуществом описываемого типа регулятора.

Помимо подмагничивающей обмотки пик-трансформаторы, как видно из рис. 5, были снабжены еще одной (балансной) обмоткой, питаемой от цепи стабилизации. Благодаря включению контура стабилизации к входным зажимам компенсационной обмотки через балансные обмотки пик-трансформаторов проходит не только ток стабилизации, появляющийся в периоды действия регулятора, но и постоянный ток (называемый нами балансным током), отходящий от цепи питания компенсационных обмоток

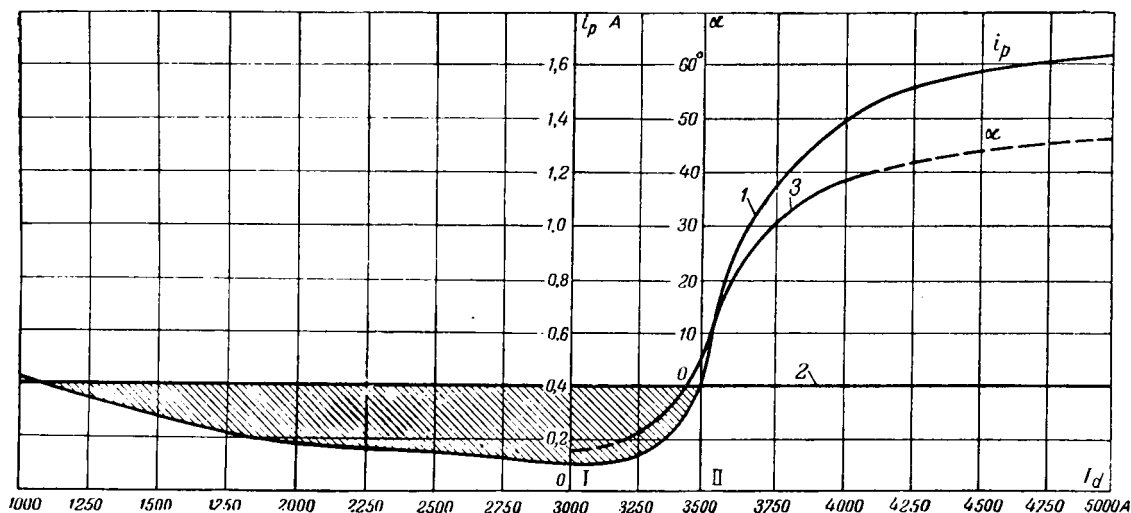


Рис. 6. Характеристики регулирования тока ртутного выпрямителя.

I — ток уставки по компенсационной обмотке; II — значение рабочего тока при нулевом угле регулирования.

При выборе для балансного тока встречного направления по отношению к току подмагничивания пик-трансформаторов мы добиваемся изменения углов регулирования от нуля (а не от минимального значения, как это имеет место, при введении в пик-трансформаторы только тока подмагничивания) и исключения влияния подъема левой ветви характеристики, что предупреждает закрытие сетками выпрямителя при случайном уменьшении тока нагрузки ниже тока уставки.

Видоизменение характеристик с учетом балансного тока показано на рис. 6. Помимо кривой исполнительного тока I здесь нанесена прямая 2 балансного тока, проведенная параллельно оси абсцисс на расстоянии, равном балансному току (в пересчете на витки обмотки подмагничивания). Отсчет углов начинается в этом случае у точки пересечения кривой I с прямой 2, и положительная разность ординат исполнительного и балансного токов определяет действительные углы регулирования на правой ветви характеристики (в приведенных характеристиках начальный угол в 5° задан фазорегулятором). Появление отрицательного результирующего тока подмагничивания на отрицательной ветви характеристики не влияет на сеточный режим регулирования, пока величина этого тока ограничена углами в границах ширины импульса кривой сеточного напряжения.

Получающийся при введении балансного тока перевод начала регулирования непосредственно на крутой участок характеристики весьма благоприятен, так как влияние углов регулирования на величину напряжения вначале относительно мало из-за косинусоидального характера кривой сеточного регулирования.

Для подбора требуемой величины балансного тока и фазы тока стабилизации служит активное сопротивление 6 (рис. 5). То обстоятельство, что с изменением тока уставки несколько меняется уровень прямой 2 на диаграмме рис. 6,

не оказывает заметного влияния на ход регулирования, требуя лишь учета поправки к показанию прибора, регистрирующего угол регулирования. С изменением тока уставки нулевой отсчет углов перемещается. При пропорциональной шкале прибора (прибор магнитоэлектрический) введение поправки не создает затруднений в отсчете углов.

Заслуживает внимания также питание компенсационной обмотки через специально сконструированный последовательно-параллельный реостат 8 (рис. 5). Это позволило включить компенсационные обмотки всех регуляторов последовательно в одну цепь, питаемую от общего вспомогательного источника постоянного напряжения, и сохранить тем не менее независимость управления каждым агрегатом, вплоть до выключения любого регулятора из работы без влияния на другие регуляторы.

Проектные параметры регулятора и порядок их определения. К проектным параметрам регулятора мы относим: геометрические размеры магнитной системы дросселя насыщения; электрические данные его обмоток; размеры и число вентильных элементов выпрямительного моста; емкости конденсаторов C_1 и C_2 ; параметры сглаживающего дросселя; величину активного сопротивления, добавочно включенного в контур стабилизации.

В первых образцах разработанного регулятора исходные значения для большей части перечисленных параметров приходилось вначале выбирать на основе приближенного расчета с заменой нелинейных величин их линейными эквивалентами. К таким величинам в первую очередь относятся: геометрия магнитной системы, обмоточные данные исполнительных катушек дросселя насыщения и число элементов выпрямительного моста. Напряжение на выпрямительном мосте $U_{к.в.}$ появляется, как видно из осциллограммы рис. 7, только к концу полупериода синусоидального напряжения или приближающегося

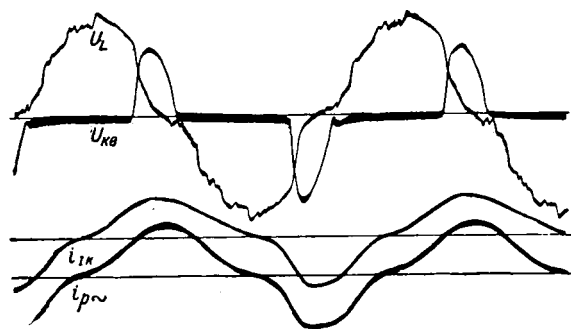


Рис. 7. Осциллограмма напряжений на исполнительной катушке (U_L), выпрямительном мосту $U_{кв}$ и токов: в одной исполнительной катушке $i_{Lк}$ и в общей цепи на входе моста $i_{p~}$.

к нему по фазе напряжения на исполнительной катушке U_L . Это объясняется специфическими условиями работы выпрямительного моста на большую индуктивность: индуктивность поддерживает ток в выходной цепи и в ветвях выпрямительного моста независимо от цепи переменного тока. Этот ток проходит через две параллельные ветви моста в те доли периода переменного тока, когда значения выходного выпрямленного тока больше мгновенных значений переменного тока. В эти доли периода через отдельные ветви моста проходит и постоянный и переменный ток. Для последнего мост является как бы участком короткого замыкания. В результате этот ток, как показывает кривая тока в катушке $i_{Lк}$ и кривая переменного тока в неразветвленной части цепи $i_{p~}$, получается близким к синусоидальному. Когда переменный ток начинает преобладать в ветвях моста над выходным выпрямленным током, мост вступает в нормальную работу, и цепь переменного тока начинает передавать мощность в цепь выпрямленного тока. Часть мощности при этом тратится на подпитку энергией сглаживающего дросселя. Кривые выпрямленного тока $i_{p~}$, напряжения на сглаживающем дросселе $U_{с.д.}$, тока в вентильном плече $i_{к.в.}$ и тока на входе моста $i_{p~}$ приведены на осциллограмме рис. 8. Некоторое различие форм кривых токов $i_{p~}$ на рис. 7 и 8 объясняется разной степенью намагниченности сердечника при снятии осциллограмм.

На основе анализа хода кривых тока и напряжения, полученных по этим осциллограммам, был затем уточнен метод расчета и сам расчет элементов. Достаточно точные результаты дает метод, предложенный В. Г. Комаром для расчета подобных нелинейных цепей, содержащих дроссель насыщения и твердые вентили [Л. 1].

Число витков обратной связи было первоначально рассчитано, а затем уточнено опытным путем, исходя из стремления получить приемлемую чувствительность регулятора при вполне стабильной его работе.

Размер первого слева окна в магнитной системе определился входящим в это окно шинным пакетом и катушками компенсационной и

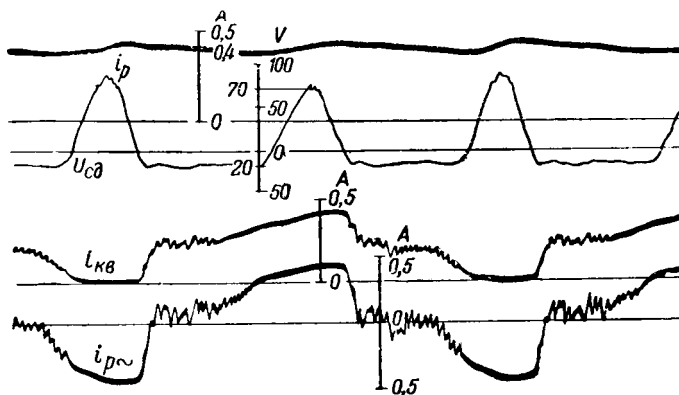


Рис. 8. Осциллограмма выпрямленного (исполнительного) тока i_p , напряжения на сглаживающем дросселе $U_{с.д.}$ тока в одном плече моста $i_{к.в.}$ и тока на входе моста $i_{p~}$.

исполнительной, а также потребными зазорами для изоляции и охлаждения. С уменьшением размера этого окна магнитный путь для постоянного потока сокращается и чувствительность регулятора повышается.

Для выпрямительного моста были использованы купроксные вентили нормального диаметра (41 мм) с допустимым током нагрузки на вентиль 0,4 А.

Емкости C_1 и C_2 были подобраны также экспериментально, исходя из условия минимального значения тока холостого хода и максимального подъема кривой до перехода на участок насыщения.

Индуктивность сглаживающего дросселя и сопротивление, ограничивающее фазу и величину тока в цепи стабилизации, были выбраны также экспериментально. Величина индуктивности выбиралась из условия получения достаточно сглаженной кривой тока, а величина сопротивления выбиралась из условия наиболее устойчивой стабилизации.

Чувствительность регулятора была учтена по действию его в системе. При большом числе параллельно работающих выпрямителей на общую серию последовательно включенных электролизных ванн, обладающих относительно большой противо-э. д. с., достаточно снизить напряжение одного из выпрямителей на 10–15% (что достигается углом регулирования в 25–30 электрических градуса), чтобы выпрямитель полностью сбросил с себя нагрузку в 4500 А. Для такого изменения угла требуется, как это видно из характеристики на рис. 6, изменение тока на входе регулятора (тока в рабочей шине на 150–200 А, что составляет примерно 4% от полного рабочего тока). Следовательно, коэффициент усиления регулятора, который является в известной мере характеристикой чувствительности его, равен 25. Эта чувствительность могла бы быть еще повышена путем: перехода к более чувствительному, исполнительному органу — пик-дросселю (взамен пик-трансформатора) либо введением в систему второго каскада усиления при помощи вторичного дросселя насыщения.

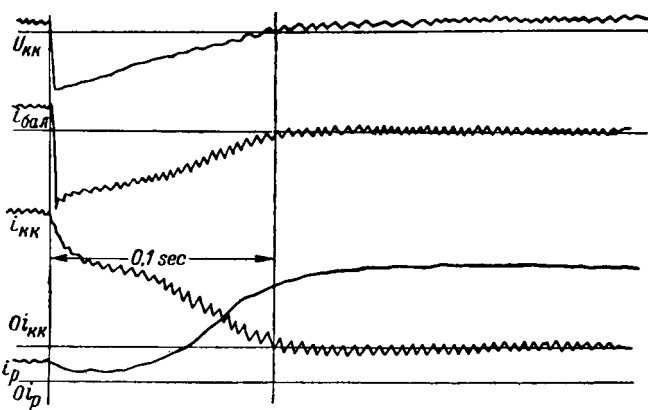


Рис. 9. Осциллограмма переходного процесса в разомкнутой цепи регулятора.

$U_{к.к.}$ — напряжение на дросселе насыщения; $i_{бал.}$ — ток балансной цепи (цепи стабилизации); $i_{к.к.}$ — ток в компенсационной катушке; i_p — исполнительный ток на выходе у регулятора.

Однако, в регулируемой, весьма мощной системе (40 ÷ 50 000 kW) не было нужды в дальнейшем повышении коэффициента усиления, в то время как обеспечение высокой стабильности системы стояло на первом месте.

Реакция регулятора на колебания напряжения в питающей сети было проверено непосредственно в эксплуатационном режиме. Для этого была использована возможность менять выходное напряжение на трансформаторах, питающих выпрямители, при помощи имеющихся в системе регулировочных трансформаторов.

В условиях этой проверки на одном из параллельно работающих выпрямительных агрегатов менялось напряжение ступенями автотрансформатора и наблюдалось изменение тока нагрузки при заданном токе установки.

Значение напряжения трансформатора и тока выпрямителя в абсолютных и относительных цифрах:

№ ступени	6	5	4	3	2	1
Напряжение питающего трансформатора, %	100	104	108	112	116	120
Ток нагрузки						
} А . .	4 500	4 550	4 600	4 650	4 675	4 700
} % . .	100	101	102,2	103,4	104	104,5

Дальнейшей проверкой работы регулятора явилось испытание его в качестве ограничителя тока. При внезапном выключении из работы двух выпрямителей токи на оставшихся в работе выпрямителях, снабженных регуляторами, изменялись не больше чем на 50 ÷ 60 А, в то время как на выпрямителях, не снабженных регуляторами, ток увеличивается при тех же условиях не менее чем на 600 ÷ 700 А.

Время действия регулятора. Для того чтобы определить собственное время действия регулятора, вторичная обмотка пик-трансформаторов была отключена от сеточной цепи ртутного выпрямителя и были сняты осциллограммы изменения напряжения и тока в отдельных звеньях си-

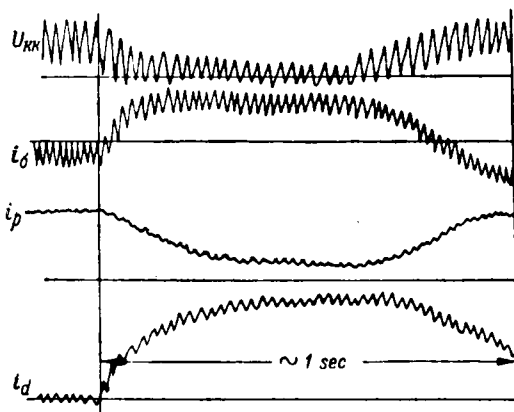


Рис. 10. Осциллограмма переходного процесса в системе при замкнутой цепи регулятора.

$U_{к.к.}$ — напряжение на дросселе насыщения; $i_{б.}$ — ток в балансной цепи; i_p — исполнительный ток; i_d — регулируемый рабочий ток.

стемы при переходном процессе, обусловленном резким изменением входной величины.

Осциллограмма, приведенная на рис. 9, показывает ход изменения напряжения и тока компенсационной обмотки ($U_{к.к.}$ и $i_{к.к.}$), исполнительного тока (i_p), а также тока стабилизации в балансной обмотке ($i_{бал.}$) после мгновенного выключения тока в компенсационной обмотке и замыкания ее на цепь стабилизации. Через шину рабочего тока при этом проходил полный рабочий ток. Пульсации этого тока шестикратной частоты (300 Hz), передаваемые путем индукции в компенсационную обмотку, а через нее и в балансную обмотку, были использованы в данной осциллограмме в качестве градуировочного масштаба для времени. Исходя из этого масштаба, мы видим, что переходный режим полностью заканчивается примерно в 0,1 сек. Принимая, что для затухания требуется около пяти постоянных времени, получаем, что собственное время регулятора равно 0,02 сек. Это дает основание отнести описываемый регулятор к быстродействующим.

Осциллограмма, характеризующая протекание переходного процесса в замкнутой энергетической системе при действии регулятора, приведена на рис. 10.

Здесь один из ртутных выпрямителей мгновенно отпирается сетками при полном токе установки. Весь переходный процесс заканчивается в этом случае за период времени, равный примерно 1 сек. При этом ток выпрямителя в переходном режиме превышает в течение небольшого времени значение тока установки и приходит затем без последующих колебаний к своему конечному значению.

Приведенные осциллограммы показывают, что собственное время регулятора на порядок величины меньше постоянной времени регулируемой системы.

Использование регулятора в качестве пускового устройства. Добавочным преимуществом описываемого типа регулятора является его приспособленность к использованию в качестве пу-

ского устройства, а также для ручного регулирования в широком диапазоне значений рабочего тока. Действительно, если включить вспомогательную цепь переменного тока, питающую исполнительные катушки и выпрямительный мост, и оставить без тока компенсационную катушку регулятора, то регулятор, отдавая в цепь подмагничивания большой ток регулирования, полностью закроет сетками выпрямитель.

Если после этого постепенно вводить при помощи комбинированного реостата 8 (рис. 5) ток в цепь компенсационной обмотки, то ток ртутного выпрямителя будет нарастать до полной величины.

Для выключения ртутного выпрямителя из работы достаточно, наоборот, уменьшить до определенного минимума ток уставки. Выпрямитель сбрасывает при этом весь ток нагрузки.

Пользуясь реостатом, введенным в общую цепь питания компенсационных обмоток, можно поднимать и снимать нагрузку одновременно на всех включенных в работу выпрямителях. В условиях питания выпрямителями электрических установок большой мощности этот способ дает весьма большие удобства, освобождая персонал от достаточно напряженной операции по вводу в действие или выключению из работы всей подстанции в целом.

Другие виды применения регуляторов. В силу простоты устройства и высоких эксплуатационных свойств этот регулятор может найти свое применение и для регулирования тока и напряжения электрических машин как постоянного, так и переменного тока, а также приме-

няются в разного рода типах электрического привода, в триггерных и мощных релейных схемах. При регулировании напряжения или тока машин выход регулятора должен быть введен в цепь возбуждения. При регулировании напряжения машин постоянного тока на магнитную систему дросселя насыщения надевается катушка, питаемая током пропорционального напряжения. При регулировании тока или напряжения машин переменного тока ток последней предварительно выпрямляется вентильным мостом. При использовании регулятора в триггерных или релейных схемах число витков обратной связи должно быть увеличено настолько, чтобы при небольшом подмагничивании системы произошел скачок выходного тока от малых его значений к большим.

В мощном приводе постоянного тока, разработанном под руководством автора во Всесоюзном электротехническом институте им. Ленина, все вопросы автоматического управления приводом были успешно решены при применении описанного регулятора.

Описанный в статье регулятор был предложен, разработан, установлен и включен в действие сотрудниками Всесоюзного электротехнического института им. Ленина И. Л. Кагановым и А. А. Саковичем (авторское свидетельство № 63848 от 31 августа 1944 г.). В руководстве настройкой промышленной эксплуатации принимал участие И. В. Антик.

Литература

1. В. Г. Комар. Теория работы твердых выпрямителей в нелинейных цепях управления. Диссертация, МЭИ, 1947.



Дугогасящие свойства современных вентильных разрядников

Кандидат техн. наук В. П. САВЕЛЬЕВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Проблема гашения дуги сопровождающего тока искровым промежутком вентильного разрядника возникла в СССР в 1935 г. и разрабатывалась в ВЭИ при проектировании первых разрядников отечественного производства. В то время было составлено схематичное представление о процессе, основанное на общих положениях теории гашения коротких дуг переменного тока [Л. 1]. Перед лабораториями и промышленностью постоянно возникали задачи определения дугогасящих свойств искровых промежутков при разработке новых типов разрядников.

С 1935 по 1941 г. в этом направлении было проведено большое количество исследований с целью измерения токов, обрываемых искровыми промежутками разрядников. Опыты производились и в лабораторных установках, и в сетях энергообъединений с напряжениями от 110 В до 110 кВ. В результате этих работ к 1945 г. в ВЭИ был собран весьма обширный и ценный материал по измерению токов, обрываемых искровыми промежутками разрядников. Большое количество данных по обрываемым токам успешно использовалось при установлении номинальных величин сопровождающих токов для разрядников, выпускаемых промышленностью.

Однако, отсутствие специальных данных по электрической прочности, восстанавливаемой промежутком разрядника после прохождения тока, ограничивало применение имеющегося материала и служило серьезным препятствием для проведения каких-либо расчетов и обобщений в области дугогасящих свойств разрядников.

Общее представление о процессах в искровом промежутке разрядника и задачи исследования. Процесс образования сопровождающего тока в искровом промежутке может быть схематически представлен следующим образом. В некоторый момент времени искровой промежуток оказывается под воздействием импульсной волны напряжения. При достижении пробивного напряжения происходит пробой искрового промежутка, сопровождаемый дуговым разрядом

Рассматривается процесс обрыва дуги сопровождающего тока в вентильном разряднике. По новой методике измеряется восстанавливающаяся прочность единичного искрового промежутка разрядников. Определяется прочность системы промежутков разрядника. Путем сопоставления прочности системы промежутков с восстанавливающимся напряжением сети для типовых энергосистем оцениваются дугогасящие свойства разрядников.

под действием импульсного тока. В дальнейшем, в зависимости от совпадения или несовпадения полярности импульсной волны с мгновенным значением э. д. с. сети сопровождающий ток может

вообще не появиться.

Процесс перехода импульса в дугу сопровождающего тока является предметом специального изучения и здесь подробно не рассматривается.

В дальнейшем предполагается, что в наличии оказываются условия, обеспечивающие переход импульса в сопровождающий ток.

Установившаяся дуга сопровождающего тока горит в течение части полупериода и обрывается при подходе тока к нулевому значению. После перехода тока через нуль искровой промежуток оказывается под воздействием восстанавливающегося напряжения сети. Это напряжение может быть синусоидальным, промышленной частоты, и может быть быстро нарастающим с крутизной, определяемой собственной частотой колебаний сети. Последний случай является следствием появления угла сдвига фаз между э. д. с. сети и током через разрядник.

В соответствии с теорией С л е п я н а можно считать, что обрыв дуги сопровождающего тока произойдет, если восстанавливающееся напряжение сети будет ниже восстанавливаемой прочности искрового промежутка. В противном случае произойдет повторное зажигание, и разрядник, очевидно, не оборвет дугу и в последующие полупериоды, что вызовет его разрушение и приведет к аварии в сети.

Возможный вариант протекания переходного процесса изображен на рис. 1. Падение волны напряжения на промежуток совпадает с восходящей частью синусоиды э. д. с. сети противоположной полярности. После перехода импульсного тока через нуль и повторного зажигания образуется дуга сопровождающего тока, которая длится в течение большей части полупериода. После перехода сопровождающего тока через нуль промежуток оказывается под воздействием

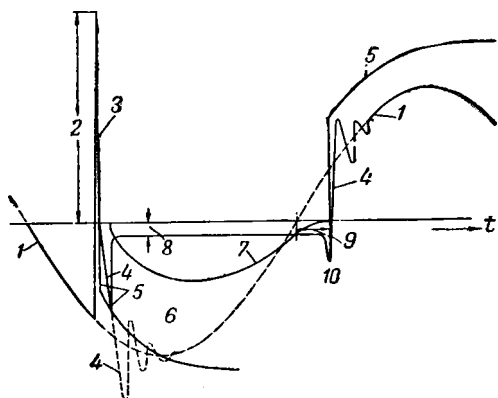


Рис. 1. Переходный процесс в искровом промежутке вентильного разрядника.

1—в. д. с. сети; 2—импульсное пробивное напряжение промежутка; 3—импульсный ток; 4—восстанавливающееся напряжение; 5—восстанавливающаяся прочность; 6—момент зажигания дуги; 7—сопровождающий ток; 8—напряжения на дуге; 9—угол сдвига; 10—пик гашения.

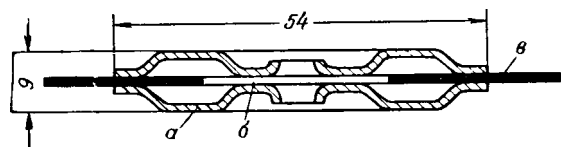


Рис. 2. Единичный искровой промежуток (в разрезе).

а—электрод; б—междуэлектродное пространство; в—миканит; Размеры в мм.

восстанавливающегося напряжения, имеющего характер колебательного процесса. Прочность промежутка растет быстрее, чем восстанавливающееся напряжение, и сопровождающий ток обрывается.

Очевидно, что основной целью исследований процесса гашения должно явиться изучение восстанавливающейся прочности систем промежутков разрядников и сопоставление прочности с восстанавливающимся напряжением сети.

Постановка и проведение экспериментов. Исследование восстанавливающейся прочности систем промежутков разрядников может быть сведено к изучению характеристик единичного искрового промежутка, являющегося составным элементом любого разрядника. Этот метод облегчает проведение опыта, так как при этом требуются минимальные мощности и напряжения испытательных установок. Типичный искровой промежуток (рис. 2) состоит из двух латунных электродов и миканитовой прокладки между ними, определяющей междуэлектродное расстояние порядка $0,5 \div 1$ мм. По своим физическим свойствам процесс в единичном воздушном промежутке должен быть отнесен к типу коротких дуг между холодными электродами [Л. 2, 3]. Как известно, короткой дугой можно считать разряд, при котором восстанавливающаяся прочность искрового промежутка в период гашения определяется только катодным пространством, а прочность остальной части промежутка настолько мала, что ею можно пренебречь. Искровые промежутки современных разрядников пропускают сопровождающие токи, обычно не превышающие $50 \div 70$ А_{max}. За время горения дуги в течение одного полупериода

такие токи не могут вызвать повышения температуры латунных электродов, достаточной для поддержания термической эмиссии при уменьшении тока и переходе его через нуль.

Термическая эмиссия возможна лишь внутри дугового пространства, в то время как катодное падение у электродов поддерживается в основном за счет автоэлектронной эмиссии [Л. 2]. При уменьшении тока при подходе к нулевому значению ионизация дугового пространства становится все менее интенсивной, а напряжение, необходимое для поддержания разряда, возрастает. После перехода тока через нуль полярность электродов меняется, и промежуток приобретает начальную прочность, определяемую катодным падением напряжения [Л. 2].

Очевидно, что формой кривой тока при подходе к нулевому значению определяется баланс энергии внутри дугового пространства, степень деионизации промежутка к моменту перехода тока через нуль и, как следствие, величина начальной прочности промежутка после перехода через нуль.

Прежние методы измерения восстанавливающейся прочности. Впервые скорости нарастания электрической прочности воздушного промежутка были определены в 1928 г. [Л. 2, 3, 5]. В то время еще не пользовались осциллографом, и результирующая кривая прочности определялась расчетным путем, как огибающая кривых критических скоростей нарастания приложенного напряжения, рассчитанных по параметрам цепи. Наиболее близкими по характеристикам к промежутку разрядника в опытах Слепяна и Броуна были холодные медные электроды при длине 1,6 мм. Прочность промежутка измерялась только в начальные моменты времени после перехода тока через нуль. По данным Слепяна начальная прочность составляет 230 В и возрастает почти по линейному закону в течение 100 мкс до 430 В и далее за 220 мкс до 600 В. Было подтверждено, что термическая эмиссия не влияет на скорость восстановления прочности (латунные электроды при токах до 300 А). С точки зрения современной измерительной техники несомненным недостатком кривых Слепяна является косвенный способ их получения вместо записи на катодном осциллографе. В 1938 г. исследованиями восстанавливающейся прочности занимались Хох и Хаяма [Л. 7]. При измерении была применена схема Слепяна, но запись производилась катодным осциллографом. Исследованию были подвергнуты промежутки длиной 5 мм в воздухе при различных давлениях, при синусоидальных токах от 10 до 100 А. Были получены значения начальной прочности (при давлении 1 ат) от 600 до 1 600 В.

Далее исследования с короткими промежутками проводили Бауэр и Кобин [Л. 6]; исследовалась восстанавливающаяся прочность малых промежутков в азоте при разных давлениях ($1 \div 35$ ат) и токах ($0,2 \div 8$ А). Запись производилась катодным осциллографом. Авторами были применены два метода измерения восстанавливающейся прочности. По первому методу, как и в прежних работах, дуга шунтировалась омическими сопротивлениями, изменявшими крутизну нарастания восстанавливающегося напряжения. Время от момента гашения дуги до повторного зажигания при этом не удавалось получить более 2 мкс. По второму методу применялся управляемый тиратрон, шунтировавший дугу в течение определенной части полупериода, после чего к промежутку прикладывалось быстро нарастающее восстанавливающееся напряжение, которое вызывало повторное зажигание. При этом можно было измерить восстанавливающуюся прочность в любой точке полупериода после гашения дуги. Принципиальным недостатком этого способа является искажение действительного процесса, так как ток в промежутке внезапно обрывается в момент шунтировки дуги тиратроном вместо того, чтобы плавно подходить к нулю, как это имеет место в

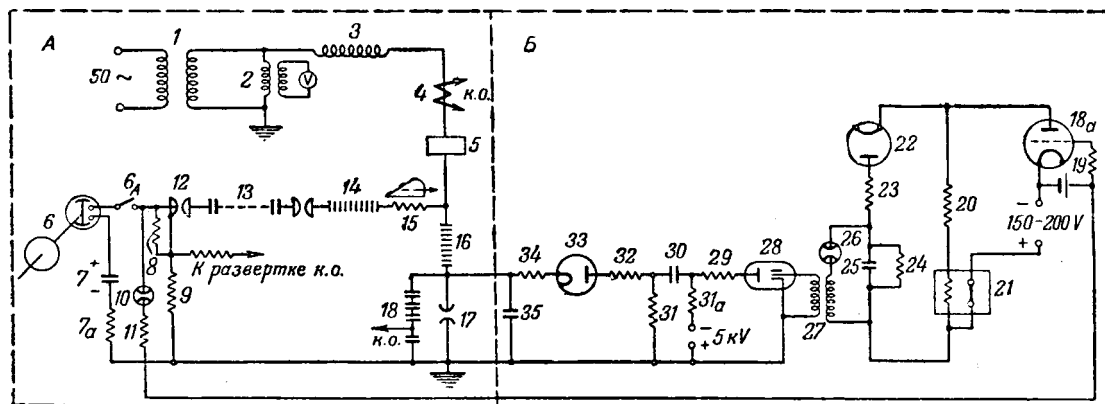


Рис. 4. Схема измерения восстанавливающейся прочности искровых промежутков.

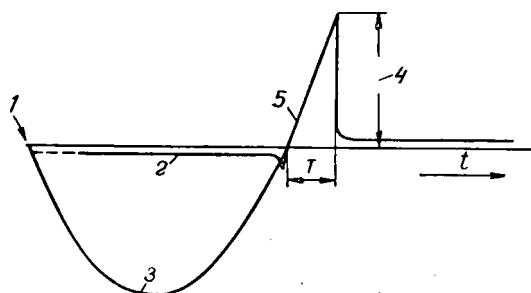


Рис. 5. Типовая осциллограмма, снятая в схеме рис. 3.
1—момент зажигания; 2—напряжение на дуге; 3—ток; 4—восстанавливающееся напряжение сети; 5—напряжение повторного зажигания.

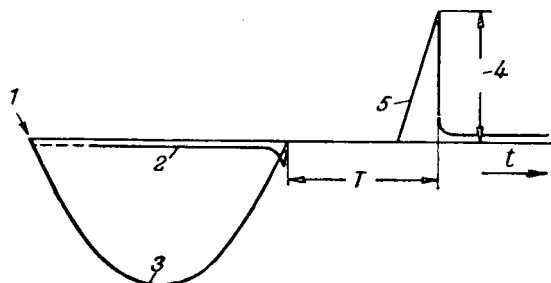


Рис. 6. Типовая осциллограмма, снятая в схеме рис. 4.
1—момент зажигания; 2—напряжение на дуге; 3—ток; 4—напряжение повторного зажигания; 5—импульсное наложенное напряжение.

к исследуемому единичному промежутку 17. Импульсный пробой искровых промежутков и зажигание дуги сопровождающего тока производятся через синхронный замыкатель с промежуточным контуром 7 от импульсного ударного контура 13.

Напряжение на трансформаторах поддерживается порядка 6—7 kV_{eff} . Величина сопровождающего тока регулируется тиритовыми дисками 5. Дополнительные промежутки 16 служат для надежного обрыва дуги сопровождающего тока после его перехода через нуль и для полного отделения после этого исследуемого промежутка 17 от источника напряжения промышленной частоты.

Таким образом, единственное назначение этой части схемы пропускать через единичный промежуток полупериод тока, вызывающий ионизацию междueleктродного пространства.

Для измерения восстанавливающейся прочности предназначен контур Б. В основе этой части схемы лежит принцип подачи на исследуемый промежуток импульсного напряжения в различные регулируемые моменты времени, синхронизированные с моментом перехода через нуль тока в контуре А. Контур Б приходит в действие от пускового тириатрона 18-а, связанного сеточной цепью с промежуточным контуром 7 через искровой промежуток разрядника 10. При открытии тириатрона 18-а напряжение от сети постоянного тока подается на нагрузочное сопротивление 20 и обмотку телефонного реле 21. В этот момент начинается зарядка конденсатора 25 через кенотрон 22 с регулируемым током накала. Эта часть схемы является электронным реле времени контура. Напряжение на конденсаторе 25, возросшее до величины 80 ÷ 90 В, вызывает пробой разрядника 26 и разряд конденсатора 25 через низковольтную обмотку трансформатора 27. Импульсное напряжение, появляющееся в высоковольтной обмотке трансформатора 27, вызывает подсвечивание и зажигание в триггере 28; в этот момент происходит разряд импульсного контура 30 через кенотрон 33, и на исследуемый промежуток 17 подается волна с косоугольным фронтом. Крутизна волны регулируется током накала кенотрона 33, сопротивлением 34 и емкостью 35.

Напряжение пробоя и время регистрируются катодным осциллографом через емкостный потенциометр 18. Путем изменения тока накала кенотрона 22 и емкости 25 регулируется момент подачи волн напряжения различной крутизны на исследуемый промежуток. Реле 21 предназначено для самоблокировки схемы и снятия анодного напряжения с тириатрона 18-а после зажигания. В этой схеме оказывается возможным при однажды установленной амплитуде и форме полупериода тока снимать для каждого такого значения тока кривую восстанавливающегося напряжения. Все измерения восстанавливающейся прочности проведены для сопровождающих токов в интервалах: 4 ÷ 4,5 А, 16 ÷ 20 А, 40 ÷ 50 А и 70 ÷ 80 А. Этот диапазон охватывает все значения номинальных токов, обычно допускаемых в современных конструкциях вентильных разрядников. Для получения полного полупериода сопровождающего то-

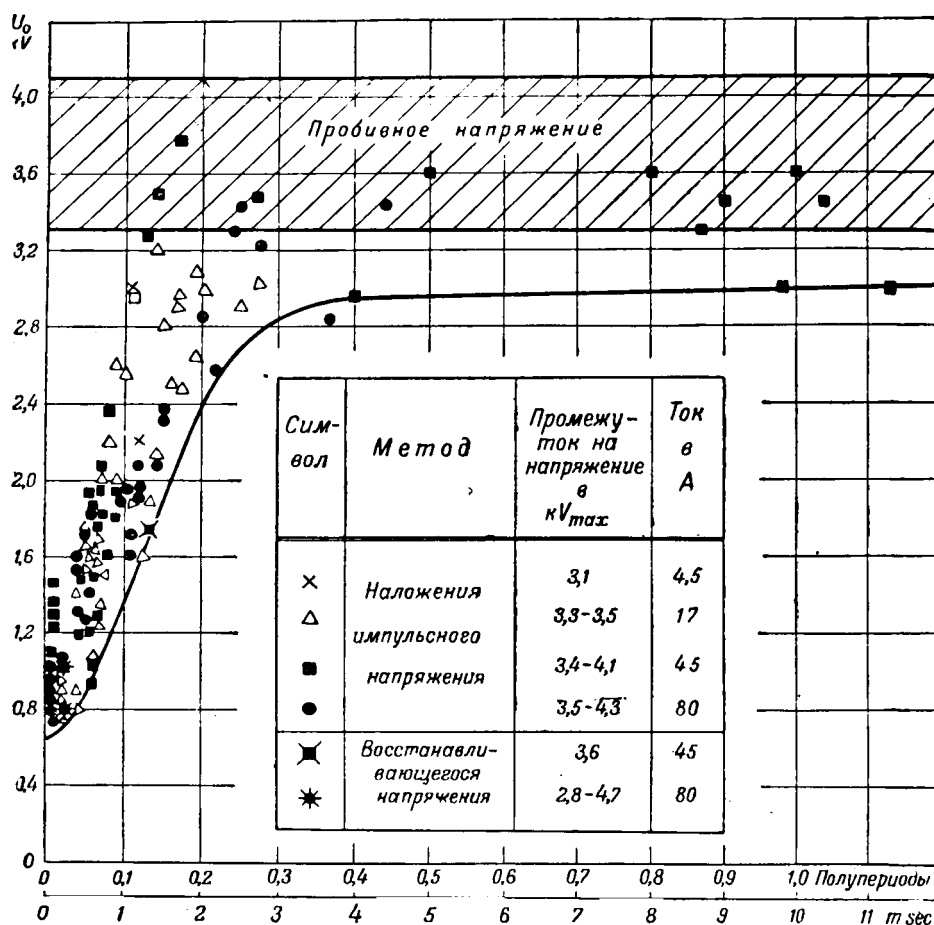


Рис. 7. Восстанавливающаяся прочность искрового промежутка.

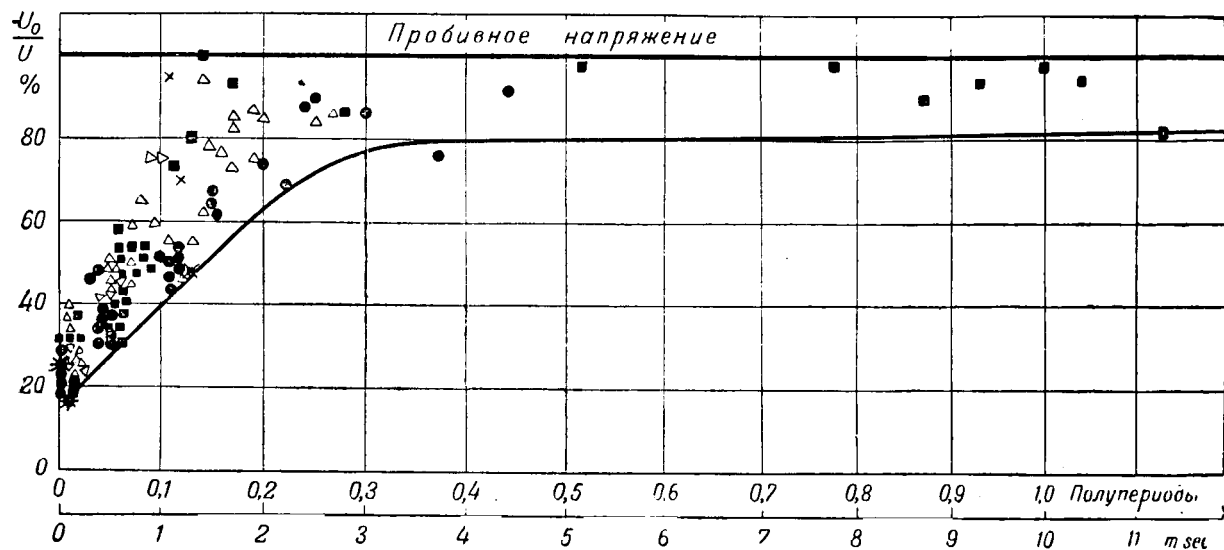


Рис. 8. Восстанавливающаяся прочность искрового промежутка (в %).

ка зажигания дуги производится около нулевого значения э. д. с. сети на восходящей ветви синусоиды. Две типовые осциллограммы, снятые первым и вторым методом, приведены на рис. 5 и соответственно на рис. 6.

Результаты экспериментов. Результаты измерения восстанавливающейся прочности, полученные обоими методами, представлены кривыми рис. 7 и 8.

Для оценки минимальной прочности искровых промежутков разрядников кривые прочности нанесены как нижние огибающие всех полученных измерений. Среднее значение начальной пробивной прочности исследованных единичных промежутков составляет $3,5 \text{ kV}_{\text{max}}$ с колебаниями от 2,8 до $4,7 \text{ kV}_{\text{max}}$. Измерениями охвачен диапазон времени от 15 мс до 11 мс для токов от 4,5 до $80 \text{ A}_{\text{max}}$.

На рис. 7 приведена зависимость напряжения повторного зажигания от времени после перехода тока через нуль. По оси абсцисс отложено время в долях полупериода и в миллисекундах, по оси ординат — напряжение в киловольтах.

Расположение точек кривой указывает на быстрый рост прочности промежутка. Можно считать, что с начального значения, равного $600 \div 700 \text{ V}$, напряжение растет почти линейно до $2,6 \div 2,7 \text{ kV}$ в течение 2,0—2,5 мс.

Дальнейший рост прочности прекращается, не достигая пробивного напряжения и почти незаметен вплоть до 10 мс (1 полупериод).

Начальное значение прочности промежутка составляет 600 V , что значительно больше $230 \div 300 \text{ V}$, полученных Слепианом для промежутка 1,6 мм, и несколько выше величины, измеренной для промежутка 1 мм Бауэром и Кобин. Здесь, очевидно, сказывается несинусоидальность формы тока, при которой наблюдается более слабая ионизация промежутка, когда ток подходит к нулевому значению, и начальная прочность оказывается поэтому выше, чем в опытах, проведенных при синусоидальном токе.

На основании этого можно считать, что применявшаяся ранее в отдельных расчетах разрядников прочность порядка 200 V (по Слепиану) была заниженной. Из полученных результатов нельзя вывести заключения о значительном влиянии величины тока на скорость последующей деионизации промежутка. Значения напряжений повторного зажигания для всех токов от 4,5 до 80 A лежат примерно в одной и той же области. Повидимому, изменение тока в этих пределах заметно не сказывается на характеристике дуги в первый полупериод и на последующей деионизации из-за отсутствия термической ионизации у электродов промежутка. Важно также отметить, что восстанавливающаяся прочность в течение последующего полупериода так и не достигает уровня пробивного напряжения.

В более общем и наглядном виде данные кривой прочности рис. 7 представлены на рис. 8 в форме «относительной прочности» u'_0 в виде выраженного в процентах отношения:

$$u'_0 = \frac{\text{прочность промежутка}}{\text{пробивное напряжение}}.$$

Здесь начальная прочность промежутка составляет 15% и ни в одной точке кривой нижняя огибающая не поднимается выше 80% пробивного напряжения. Для получения зависимости прочности промежутка от междуэлектродного расстояния были испытаны отдельные промежутки с пробивным напряжением от 1,5 до $9,5 \text{ kV}_{\text{max}}$ при токах $4,5 \div 5 \text{ A}$.

Результаты измерений приведены на рис. 9. Относительная прочность, вычисленная по кривой восстановления при 1 мс, резко падает с увеличением междуэлектродного расстояния. Это подтверждает наличие характеристики «короткой дуги» в промежутке. В первые моменты после гашения дуги прочность определяется быстро деионизирующимся пространством у металлического электрода, которым является катод, в то время как термическая ионизация еще поддерживает проводимость в остальной части дугового пространства. В этой части деионизация обуславливается охлаждением и диффузией и протекает значи-

тельно медленнее. Это согласуется с тем, что увеличение междуэлектродного расстояния в известных пределах не сказывается на абсолютном значении прочности промежутка (в киловольтах) в начальные моменты, в то время как относительная прочность падает. Из рис. 9 видно, что через 1 мс прочность промежутка с пробивным напряжением $1,5 \text{ kV}_{\text{max}}$ восстанавливает прочность до 90%, а промежутки с пробивным напряжением $9,5 \text{ kV}_{\text{max}}$ — только до 35%.

Оценка дугогасящих свойств разрядников. Дуга сопровождающего тока обрывается искровым промежутком разрядника после первого перехода тока через нуль, если суммарная прочность всей системы единичных промежутков оказывается выше восстанавливающегося напряжения сети. Для оценки дугогасящих свойств разрядника необходимо произвести сопоставление кривых восстанавливающегося напряжения сети $U_c = f(t)$ и восстанавливающейся прочности $U_0 = \varphi(t)$. В свою очередь, очевидно, что процесс восстановления прочности системы промежутков должен зависеть от характера воздействия приложенного напряжения.

Работами Л. И. Иванова в ВЭИ [Л. 9] показано, что для условий установки вентильных разрядников в типовых энергосистемах за восстанавливающееся напряжение может быть принято синусоидальное напряжение нормальной промышленной частоты.

В общем случае искровой промежуток разрядника представляет собой сложную систему единичных промежутков. При определении суммарной прочности промежутка необходимо считаться с тем, что последняя не составляет из арифметической суммы прочностей единичных промежутков. Можно допустить, что при синусоидальном восстанавливающемся напряжении суммирование восстанавливающихся прочностей единичных промежутков имеет ту же закономерность, что суммирование пробивных напряжений при пробое искрового промежутка напряжением 50 Гц.

Известно, что пробивное напряжение системы промежутков разрядника, как правило, оказывается ниже арифметической суммы пробивных напряжений составляющих единичных промежутков. Такой результат является следствием сложной закономерности развития в системе промежутков из-за неравномерного распределения напряжения, различия в характеристиках отдельных промежутков и т. п.

Для разрядника, состоящего из n единичных промежутков, эффект такого явления количественно учитывается введением некоторого коэффициента использования, входящего в соотношение

$$U = knu, \quad (1)$$

где u — пробивное напряжение единичного промежутка (амплитудное значение);

n — число единичных промежутков;

k — коэффициент использования;

U — пробивное напряжение разрядника (амплитудное значение).

По аналогии с этим для восстанавливающейся прочности разрядника

$$U_0 = knu'_0, \quad (2)$$

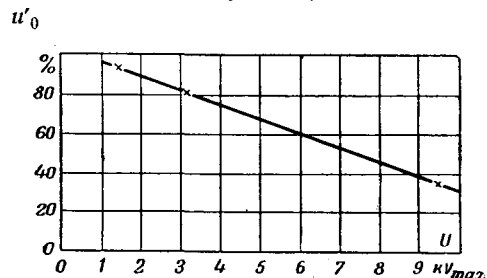


Рис. 9. Восстанавливающаяся прочность промежутка в зависимости от междуэлектродного расстояния.

Ток = $4,5 \text{ A}_{\text{max}}$, время = 1 мс.

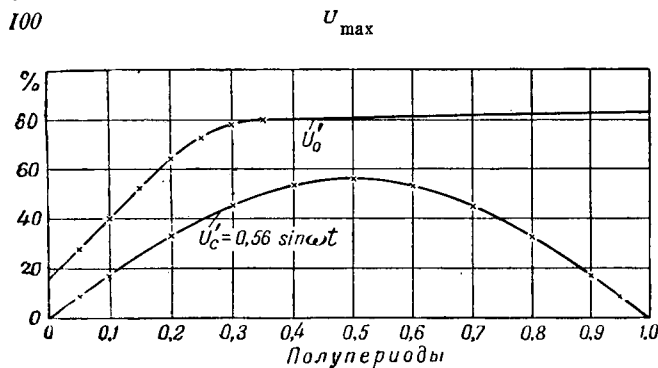


Рис. 10. Дугогасящие свойства вентильных разрядников.

где u_0 — восстанавливающаяся прочность единичного промежутка;

U_0 — восстанавливающаяся прочность разрядника.

Совместное решение уравнений (1) и (2) дает:

$$\frac{U_0}{U} = \frac{u_0}{u}. \quad (3)$$

Отношение $\frac{u_0}{u}$ есть не что иное, как относительная

прочность единичного промежутка u'_0 , в то время как $\frac{U_0}{U}$ может быть названо относительной прочностью разрядника U'_0 .

Из соотношения (3) следует, что относительная прочность разрядника равна относительной прочности единичного промежутка

$$U'_0 = u'_0. \quad (4)$$

Таким образом, для любого разрядника его относительная прочность оказывается известной, если известны характеристики его единичного промежутка. Оценка дугогасящих свойств разрядника должна быть произведена путем сопоставления кривой восстанавливающейся относительной прочности U'_0 с синусоидально восстанавливающимся напряжением U_c . Последнее также должно быть представлено в виде относительной величины, т. е. отношения U_c к пробивному напряжению U_{max} разрядника. Наиболее тяжелым случаем будет воздействие на искровой промежуток наибольшего допустимого напряжения разрядника.

Как известно, действующими нормами предписывается соблюдение отношения пробивного напряжения разрядника к наибольшему допустимому в пределах от 1,8 до 2,3. Меньшая цифра относится к наиболее тяжелым условиям гашения — к классу разрядников для сетей с незаземленной нейтралью.

В этом случае имеет место соотношение

$$U_{max} = 1,8 U_{c\ max}$$

Относительная величина восстанавливающегося напряжения (мгновенное значение) будет:

$$U'_c = \frac{U_c}{U_{max}} = \frac{U_{c\ max}}{1,8 U_{c\ max}} \sin \omega t = \frac{1}{1,8} \sin \omega t = 0,56 \sin \omega t \quad (6)$$

На рис. 10 приведено графическое сопоставление восстанавливающегося напряжения U'_c и восстанавливающейся прочности U'_0 . Значения прочности U'_0 взяты из рис. 8. Из взаимного расположения кривых U_c и U'_0 видно, что современные разрядники обладают запасом надежности, который даже в предельно неблагоприятных случаях не ниже 140%, вблизи амплитудного значения синусоиды восстанавливающегося напряжения. На остальных частях кривой запас надежности еще значительнее.

Наименьший запас надежности вблизи амплитуды синусоиды подтверждается осциллограммами испытания разрядников, где повторные зажигания происходят именно в этой области в тех случаях, когда при нормальном сопротивляющемся разрядник имеет заниженное пробивное напряжение.

Выводы. Оценка дугогасящих свойств разрядников, проведенная на основе результатов измерения восстанавливающейся прочности искровых промежутков, указывает на наличие запасов надежности, имеющихся в современных разрядниках. Это согласуется с прежними представлениями, выведенными на основе измерений токов, обрывааемых искровыми промежутками.

Резервы в дугогасящих свойствах должны быть учтены при разработке новых разрядников для упрощения и унификации конструкций.

Данные о прочности промежутков разрядников могут быть использованы во всех случаях определения дугогасящих свойств при несинусоидальном восстанавливаемом напряжении сети.

Литература

1. Л. И. Сиротинский. Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках, 1937.
2. Slepian. Tr. AIEE, стр. 1398, 1928.
3. Slepian Strom. Tr. AIEE, 1931.
4. А. Энгель, М. Штенбек. Физика и техника электрического разряда в газах, т. II, 1936.
5. Slepian. Tr. AIEE, стр. 56, 1930.
6. Bauer, Cobine. GER, 1941.
7. Hoh. El. J. of Japan, № 7, стр. 151, 1938.
8. Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений, Вып. III, 1945.
9. Л. И. Иванов. Высоковольтная защитная аппаратура. Сборник ВЭИ, 1947.

Нестационарные процессы в цепи с вентильным элементом и смешанной нагрузкой

Кандидат техн. наук, доц. Р. Д. ЛЕЙТЕС

Москва

Процесс детектирования при включении синусоидальной э. д. с. сопровождается нестационарными явлениями, искажающими форму огибающей воздействующего напряжения. В ряде случаев (например, при воздействии импульсов) с этим видом искажений приходится считаться, и исследование процессов установления при детектировании становится необходимым.

Настоящая работа посвящена рассмотрению процессов установления на нагрузке вентильного элемента с линейно-ломаной характеристикой при мгновенном включении на его вход синусоидальной э. д. с. с прямоугольной огибающей. Внутреннее сопротивление источника э. д. с. считается равным нулю.

Задача решается для случая смешанной нагрузки, содержащей сопротивление и емкость. Однако, из методических соображений вначале рассматривается процесс установления при чисто емкостной нагрузке (рис. 1, а) и лишь затем при смешанной (рис. 1, б).

Использованный метод исследования следует отнести к распространенному в теории колебаний «методу припасовывания». Этот метод заключается в замене нелинейного дифференциального уравнения несколькими линейными и «припасовывании» в точках их сопряжений постоянных интегрирования, исходя из требования непрерывности решения. В рассматриваемом случае внутри каждого из периодов высокой частоты составляются два уравнения, описывающие заряд конденсатора через внутреннее сопротивление детектора и разряд его на сопротивление нагрузки. Напряжение на нагрузке рассматривается, как функция от числа периодов, — безотносительно от формы кривой установления внутри их. Такой метод дает возможность упростить проблему, представив вентильный элемент, как некоторую систему с «переходной проводимостью», являющейся функцией от дискретного аргумента — числа периодов.

Рассматриваются процессы установления в цепи с вентильным элементом, имеющим линейно-ломаную характеристику, при мгновенном включении на ее вход синусоидальной э. д. с. с прямоугольной огибающей. Получены кривые установления при емкостной и смешанной нагрузках, позволяющие при заданных параметрах схемы определить число периодов высокой частоты, за которое напряжение на нагрузке достигает данного значения, или, наоборот, по заданному времени установления подобрать соответствующие параметры схемы.

В результате исследования получены кривые установления, позволяющие при заданных параметрах схемы определить время (точнее, число периодов высокой частоты), за которое напряжение на нагрузке достигает данного значения,

или, наоборот, по заданному времени установления подобрать соответствующие параметры схемы.

Кривая установления («переходная проводимость») при емкостной нагрузке. Рассмотрим процесс установления напряжения на емкостной нагрузке элемента с вентильным действием при мгновенном включении на вход синусоидальной э. д. с. с амплитудой, равной 1 (рис. 1а). Считаем, что детектор обладает идеальной линейно-ломаной характеристикой.

В каждом из положительных полупериодов высокой частоты (за время $\tau_0, \tau_1, \tau_2 \dots$ — рис. 2) происходит заряд конденсатора C через внутреннее сопротивление диода R_i . В качестве допущения, лежащего в основе предлагаемого метода, положим, что каждый раз заряд происходит под воздействием прямоугольного импульса, эквивалентного по площади данной части синусоидального импульса (рис. 2). Основание эквивалентного импульса равно двой-

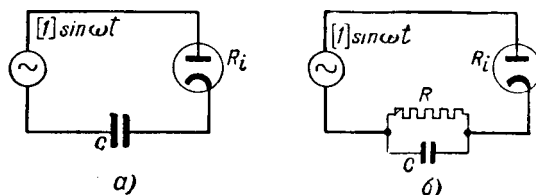


Рис. 1.

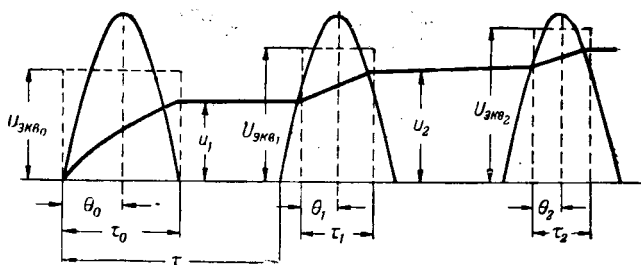


Рис. 2.

ному углу отсечки, высота (эквивалентная амплитуда) равна:

$$\frac{1}{2\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \cos \theta d\theta = \frac{\sin \theta}{\theta} = U_{\text{экв}}.$$

В промежутках между прямоугольными импульсами напряжение на конденсаторе остается постоянным.

В качестве первого приближения можно предположить, что процесс нарастания напряжения на емкости происходит под воздействием прямоугольных импульсов постоянной длительности $\tau_s = k_s \tau$ и постоянной амплитуды $U_{\text{экв}}$, не меняющейся в процессе детектирования. Тогда закон установления напряжения в зависимости от числа импульсов n имеет вид:

$$u_n = U_{\text{экв}} \left(1 - e^{-k_s n^2 \tau} \right), \quad (1)$$

здесь

$$\beta = \frac{1}{R_s C}.$$

В уравнение (1) входит дискретный параметр n — номер импульса. Однако, формально произведение $n^2 \tau$ можно считать непрерывным параметром и рассматривать (1) как закон изменения напряжения на выходе в зависимости от времени $\alpha = n^2 \tau$:

$$u = U_{\text{экв}} \left(1 - e^{-k_s \alpha} \right), \quad (2)$$

здесь

$$k_s = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{\theta_s}{\pi}.$$

В действительности угол отсечки не остается постоянным в процессе детектирования, а непрерывно уменьшается по мере нарастания напряжения; начальное значение угла отсечки $\theta_0 = 90^\circ$. Процесс установления можно считать законченным, когда напряжение на нагрузке достигнет 0,9 амплитуды напряжения на входе; конечному напряжению $u = 0,9$ соответствует $\theta_{\min} = \arccos 0,9 = 26^\circ$. Следовательно, коэффициент заполнения в процессе установления меняется от $k_0 = 0,5$ до $k_{\min} = 0,144$.

При предположении $\theta_0 = 90^\circ = \text{const}$ уравнение (2) имеет вид:

$$u = \frac{2}{\pi} \left(1 - e^{-0,5\alpha} \right). \quad (3)$$

При предположении $\theta_{\min} = 26^\circ = \text{const}$

$$u = 0,967 \left(1 - e^{-0,144 \alpha} \right). \quad (4)$$

Время установления, соответствующее уравнению $u = 0,9$ и вычисленное из уравнения (3), будет меньше истинного, так как фактически процесс нарастания по мере увеличения напряжения замедляется из-за уменьшения угла отсечки.

Совершенно очевидно, что истинная кривая установления лежит в пределах между двумя экспонентами, определяемыми уравнениями (3) и (4).

Перейдем к отысканию уравнения кривой установления $u = h(\alpha)$.

Если предположить, что процесс нарастания напряжения происходит с меняющимся углом отсечки, то это приводит к истинной кривой установления $u = h(\alpha)$; если предположить, что процесс нарастания происходит под воздействием прямоугольных импульсов одинаковой ширины $2\theta_s = 2 \arccos u_s$, то это приводит к экспоненциальной кривой (2). При этом заметим следующее обстоятельство: каким бы путем ни было достигнуто данное значение напряжения — „уровень“ u_s (или при меняющемся угле отсечки, или при импульсах постоянной ширины), в момент его достижения напряжение нарастает под влиянием э. д. с. $U_{\text{экв}} - u_s$, т. е. подчиняется закону нарастания (2) в точке, где ордината равна u_s . Иначе говоря, для каждого данного значения $u = u_s$ скорость нарастания напряжения по истинной кривой $h(\alpha)$ совпадает со скоростью нарастания по вспомогательной экспоненте $f(\alpha)$. Математически это обстоя-

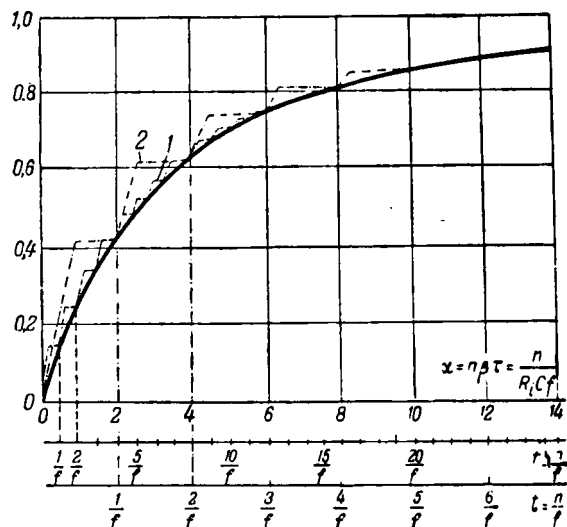


Рис. 3. 1 — истинная „кусочная“ кривая установления, если

$\beta \tau = \frac{\tau}{R_s C}$ мало; 2 — то же, если $\beta \tau$ велико.

тельство может быть сформулировано так: касательная к истинной кривой $u = h(\alpha)$ при каждом данном значении u имеет тот же угол наклона, что и касательная к экспоненте $u = f(\alpha)$ для ширины импульсов, определяемой данным уровнем, в точке с ординатой, равной данному уровню.

Этот метод приводит (приложение 1) к следующему выражению для определения уравнения кривой установления

$$\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{1 - \lg \theta} = \alpha. \quad (5)$$

Интеграл в левой части в конечном виде не берется; однако, можно построить зависимость $\theta = \varphi(\alpha)$, а следовательно, и $u = \cos \theta = h(\alpha)$, прибегнув к численному интегрированию уравнения (5). Результаты вычислений по формуле трапеций представлены кривой установления $u = h(\alpha)$ на рис. 3 сплошной линией.

Кривая $u = h(\alpha)$ рис. 3 не является истинной кривой установления, отражающей все детали процесса нарастания напряжения внутри каждого периода детектируемой э. д. с., так как истинная кривая — кусочная, с постоянными значениями напряжения в промежутках между положительными полупериодами, причем промежутки эти по мере установления увеличиваются (соответственно уменьшению угла отсечки, см. рис. 2 и пунктир на рис. 3). Однако, кривая $u = h(\alpha)$ правильно отражает общий характер процесса, его макроструктуру, и позволяет определить напряжение на конденсаторе по прошествии целого числа периодов высокой частоты. В этом смысле можно говорить о „переходной проводимости“ детектора, понимая под этим термином зависимость напряжения на его нагрузке от параметра

$\alpha = n^2 \tau$ (включающего в себя время $t = n\tau = \frac{n}{f}$ и постоянную времени детектора $\frac{1}{\beta} = R_s C$) при воздействии на

вход единичного толчка синусоидального напряжения.

Кривую установления рис. 3 можно использовать и для случая, когда в цепь детектора включено отрицательное напряжение E ; следует лишь перенести начало координат в ту точку кривой, где $u = h(\alpha) = E$. Такой метод является вполне естественным, так как процесс нарастания в каждой точке кривой $u = h(\alpha)$ определяется значением смещающего напряжения, действующего в цепи детектора, независимо от причины его появления. В данном случае процесс нарастания напряжения начинается с той точки,

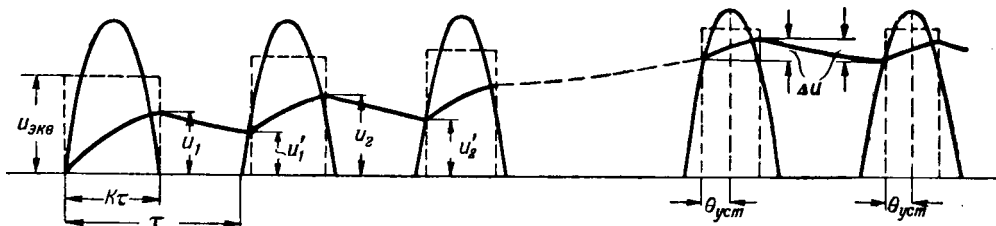


Рис. 4.

где $h(\alpha) = E$; предельным значением напряжения на конденсаторе будет $1 - E$.

Вопрос о точности примененного нами метода замены синусоидальных импульсов эквивалентными прямоугольными рассмотрен в приложении 2.

Процесс установления в схеме со смешанной нагрузкой. Рассматриваемая схема изображена на рис. 1, б. Введем следующие обозначения:

$$\xi = \frac{R}{R_i}; \quad a = \frac{R_i}{R + R_i} = \frac{1}{1 + \xi}; \quad b = \frac{R}{R + R_i} = \frac{\xi}{1 + \xi}.$$

Постоянная времени заряда

$$\frac{1}{\beta} = \frac{RR_i}{R + R_i} C = \frac{\xi}{1 + \xi} R_i C.$$

Постоянная времени разряда

$$RC = \frac{1}{a\beta} = \xi R_i C.$$

Если внутреннее сопротивление детектора R_i значительно меньше сопротивления нагрузки R (что соответствует условиям $\xi \approx \infty$; $a \approx 0$; $b \approx 1$), то с явлением разряда конденсатора на сопротивление нагрузки в промежутках между положительными полупериодами высокой частоты можно не считаться. Однако, при $\xi < 200$ разряд конденсатора влияет на процесс детектирования и его следует учитывать.

Процесс детектирования изображен схематически на рис. 4. Здесь также применяется метод замены синусоидальных импульсов эквивалентными прямоугольниками.

В процессе нарастания напряжения на нагрузке сопротивление и высота эквивалентных прямоугольников меняются. В установившемся режиме прирост напряжения за время заряда внутри импульса равен перепаду его за время разряда в промежутках между импульсами; устанавливается постоянный угол отсечки $\theta_{уст}$, определяющий предельное значение напряжения на нагрузке $U_{уст} = \cos \theta_{уст}$.

Можно показать (приложение 3), что напряжение на нагрузке к началу $(n+1)$ -го импульса равно:

$$u'_n = b \frac{\sin \theta}{\theta} (1 - e^{-k\beta\tau}) e^{-a\beta\tau(1-k)} \frac{1 - [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})]n e^{-na\beta\tau(1-k)}}{1 - [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})] e^{-a\beta\tau(1-k)}}. \quad (6)$$

Нашей задачей является определение зависимости напряжения на нагрузке от числа импульсов $u = F(n)$ при заданных параметрах a , b , $\beta\tau$. Непосредственно применить формулу (6) нельзя, так как при ее выводе предполагалось постоянство угла отсечки, в то время как в процессе детектирования он непрерывно меняется. Для отыскания кривой $u = F(n)$ применим, как и при исследовании детектора с емкостной нагрузкой, метод дифференциального уравнения.

Будем исходить из того факта, что касательная к искомой кривой $u = F(n)$ при каждом данном значении u имеет тот же угол наклона, что и касательная к кривой $u' = f(\theta)$, соответствующей данному углу отсечки $\theta = \arccos u$. Действительно, каким бы путем ни происходило установление до данного уровня u , напряжение в момент достижения его нарастает со скоростью, определяемой уравнением (6) при $\theta = \arccos u$ в точке, ордината которой равна данному выбранному уровню.

Этот метод приводит (приложение 4) к уравнению для определения искомой кривой

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{f(\theta)} = n, \quad (7)$$

здесь

$$f(\theta) = \frac{1}{\theta} \left[\frac{\theta}{\tan \theta} - \right.$$

$$\left. - \frac{b \left(1 - e^{-\frac{\theta}{\pi} \beta\tau} \right) e^{-a\beta\tau \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right)}}{1 - \left[1 - b \left(1 - e^{-\frac{\theta}{\pi} \beta\tau} \right) \right] e^{-a\beta\tau \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right)}} \right] \ln \left\{ \left[1 - \right. \right.$$

$$\left. \left. - b \left(1 - e^{-\frac{\theta}{\pi} \beta\tau} \right) \right] e^{-a\beta\tau \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right)} \right\}. \quad (8)$$

При $\xi = \infty$ ($a = 0$; $b = 1$) Функция $f(\theta)$ упрощается

$$f(\theta) = \left(1 - \frac{\theta}{\tan \theta} \right) \frac{\beta\tau}{\pi}$$

и формула (7) переходит в уравнение (5), выведенное для детектора с емкостной нагрузкой.

Сложность функции (8) не позволяет произвести непосредственное интегрирование в формуле (7); однако, можно применить любой из методов численного интегрирования и получить графическую зависимость $\theta = \Phi(n)$ при $\xi = \text{const}$; $\beta\tau = \text{const}$, приводящую к искомой кривой $u = F(n)$.

Уравнение для определения установившегося напряжения на нагрузке при заданных ξ и $\beta\tau$ можно получить, полагая в выражении (14) скорость изменения угла отсечки равной нулю (из-за постоянства угла отсечки в установившемся режиме):

$$\frac{\theta_{уст}}{\tan \theta_{уст}} = \frac{b \left(1 - e^{-\frac{\theta_{уст}}{\pi} \beta\tau} \right) e^{-a\beta\tau \left(1 - \frac{\theta_{уст}}{\pi} \right)}}{1 - \left[1 - b \left(1 - e^{-\frac{\theta_{уст}}{\pi} \beta\tau} \right) \right] e^{-a\beta\tau \left(1 - \frac{\theta_{уст}}{\pi} \right)}}. \quad (9)$$

Решение этого трансцендентного уравнения дает значения $U_{уст} = \cos \theta_{уст} = f(\beta\tau)$ при $\xi = \text{const}$, изображенные на рис. 5. Рассмотрение кривых показывает, что при малых значениях $\beta\tau$, если процесс установления захватывает большое число периодов, установившееся напряжение пе-

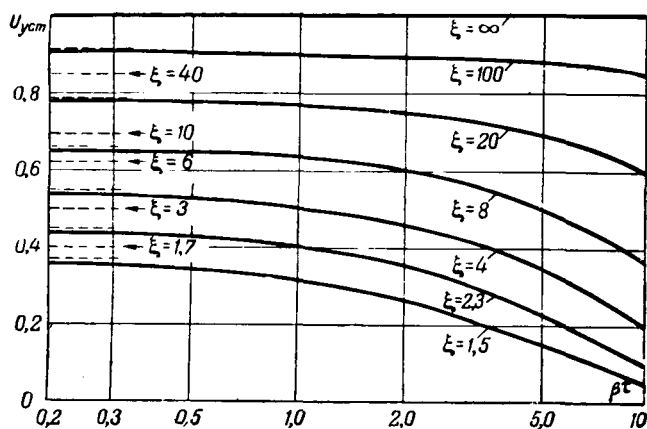


Рис. 5.

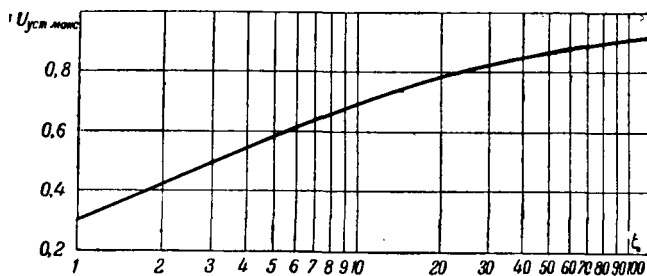


Рис. 6.

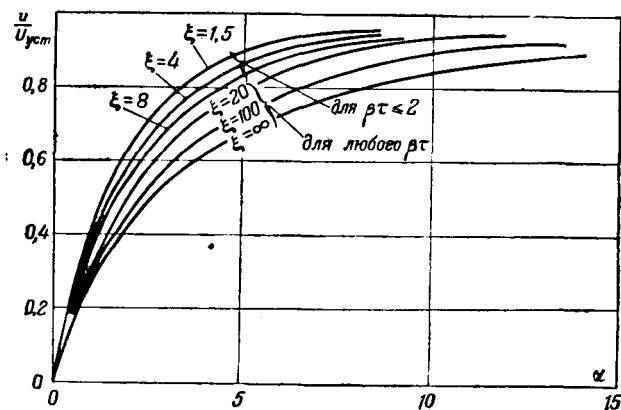


Рис. 7.

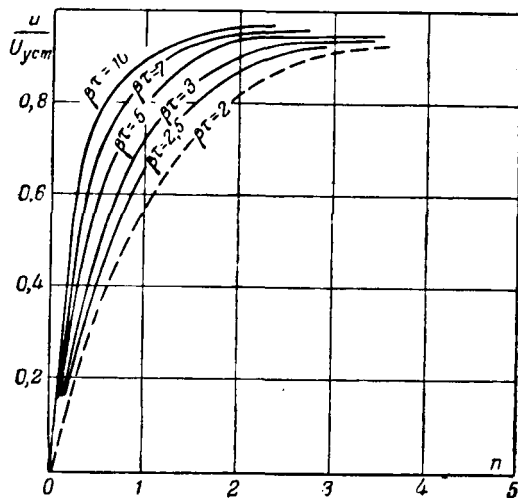


Рис. 8.

рестает зависеть от $\beta\tau$ на $U_{уст \max} = \cos \theta_{уст \min}$ влияет лишь параметр $\xi = \frac{R}{R_i}$. Зависимость $U_{уст \max} = \cos \theta_{уст \min} = f(\xi)$ можно получить, используя формулу (9), упрощенную для $\beta\tau = 0$:

$$\frac{\theta_{уст \min}}{\text{tg } \theta_{уст \min}} = \frac{1}{1 - \frac{a}{b} + \frac{a}{b} \cdot \frac{\pi}{\theta_{уст \min}}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\xi} + \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\pi}{\theta_{уст \min}}}$$

Кривые $U_{уст \max} = f(\xi)$, построенные с помощью формулы (10), изображены на рис. 6.

Для определения характера нарастания напряжения на нагрузке на рис. 7 построены кривые $\frac{u}{U_{уст}}$, где числитель

получен в результате численного интегрирования уравнения (7), а знаменатель — из решения трансцендентного уравнения (9). Анализ кривых показал, что при сопротивлении нагрузки R , значительно превышающем внутреннее сопротивление детектора R_i , т. е. при $20 \leq \xi \leq \infty$, характер кривой установления зависит лишь от параметра $\xi =$

$$= \left| \frac{R}{R_i} \right|; \text{ параметр } \beta\tau = \frac{\tau}{1 + \xi} \cdot \frac{R_i C}{R_i C} \text{ влияет на масштаб оси}$$

абсцисс, т. е. на время установления. Поэтому кривые установления построены в функции от обобщенного параметра $\alpha = n\beta\tau$. Для случая, когда сопротивление нагрузки соизмеримо с внутренним сопротивлением детектора ($1,5 \leq \xi \leq 20$) параметр $\beta\tau$ может быть учтен масштабом оси абсцисс лишь при $\beta\tau \leq 2$. Если же $\beta\tau > 2$, т. е. процесс установления практически заканчивается за $2 \div 3$ периода, следует пользоваться кривыми

$$\frac{u}{U_{уст}} = f(n) \text{ при } \beta\tau = \text{const (рис. 8).}$$

Пределы применимости кривых рис. 7 и 8 установлены, исходя из того, чтобы ошибки в определении времени установления не превышали $5 \div 10\%$.

Рассмотрение рис. 7 показывает, что для ускорения процесса нарастания выгодно уменьшение параметра $\xi = \frac{R}{R_i}$ и увеличение параметра $\beta\tau = \frac{\tau}{1 + \xi} \cdot \frac{R_i C}{R_i C}$; однако, при

этом одновременно снижается $U_{уст \max}$ (рис. 6), и чрезмерное уменьшение $\xi < 5$ ($U_{уст \max} < 0,6$) возможно лишь в том случае, если абсолютная величина напряжения на нагрузке не играет роли. Увеличение $\beta\tau$ в свою очередь связано с необходимостью чрезмерного уменьшения шунтирующей емкости, иногда практически недостижимого.

Краткий обзор литературы. Процессы установления в цепях, содержащих нелинейный элемент — детектор, впервые рассмотрены Н. Д. Папалекси [Л. 1] в 1912 г. Им проводится точное решение дифференциальных уравнений, описывающих поведение схемы, поскольку предполагается, что процесс установления занимает всего лишь несколько периодов. Этот точный метод расчета применяется в дальнейшем целым рядом авторов [Л. 2], однако использовать их результаты для наших целей не представляется возможным, поскольку нас интересует огибающая кривой установления, захватывающей большое количество периодов детектируемого напряжения.

И. В. Басик [Л. 3] использовал для расчета детектора с емкостной и смешанной нагрузкой приближенный метод рассмотрения нестационарных процессов в детекторе. И. В. Басик при рассмотрении процесса заряда конденсатора заменяет воздействие синусоидального напряжения напряжением такой формы, при которой угол отсечки в процессе заряда остается постоянным. Заменяющее напряжение изображается кривой, которая по мере увеличения напряжения на конденсаторе постепенно переходит из синусоидальной формы в прямоугольную (рис. 9).

Нетрудно видеть, что при таком предположении делается ошибка в сторону быстрого установления, так как

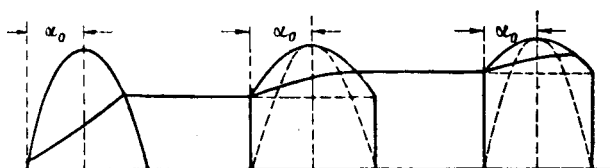


Рис. 9.

в действительности заряд конденсатора каждый раз происходит под влиянием э. д. с. меньшей длительности, чем предполагает указанный автор.

Сравнение результатов вычислений по кривым, приведенным в книге И. В. Басика (стр. 94, рис. 48), и по предлагаемому методу (рис. 3) подтвердило это соображение (приложение 5).

Выводы. Кривые установления (рис. 7, 8) и кривые рис. 5 дают возможность определить величину выходного напряжения по прошествии целого числа периодов детектируемого напряжения с момента его включения при емкостной и смешанной нагрузках, т. е. произвести проверочный расчет, или определить необходимые параметры схемы детектора по заданному времени установления (проектировочный расчет).

Указанные кривые не отражают всех деталей процесса установления, так как истинная кривая — кусочная; однако, давая огибающую выходного напряжения, они правильно отражают характер процесса.

Расчет нестационарных процессов с помощью кривых рис. 5, 7, 8 может быть применен не только в технике связи, но и в некоторых вопросах автоматики, регулирования и измерительной техники.

Приложение 1

Если принять, что заряд происходит под воздействием прямоугольных импульсов постоянной ширины $2\theta_s = 2 \arccos u_s$, определяемой данным выбранным уровнем u_s , то

$$u = U_{экс} \left(1 - e^{-k_s x}\right) = \frac{\sin \theta_s}{\theta_s} \left(1 - e^{-k_s x}\right) = f(x). \quad (11)$$

Дифференцируем эту функцию по аргументу x ; поскольку ширина импульсов постоянна,

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{\sin \theta_s}{\pi} e^{-k_s x}. \quad (12)$$

Уравнение (12) угла наклона касательной к экспоненте действительно, вообще говоря, для серии импульсов любой ширины, определяемой выбранным уровнем, и для любого значения аргумента x . Но для того, чтобы приравнять его тангенсу угла наклона касательной к истинной кривой установления, следует придать аргументу значение, дающее ординату, равную выбранному уровню. Поскольку удобно выбрать «текущий уровень» u , то из (11) имеем:

$$\ln \frac{1}{1 - \frac{\sin \theta}{\theta} u} = -k \alpha = 1 - \frac{\theta}{\sin \theta} u, \quad (13)$$

где

$$k = \frac{\theta}{\pi} = \frac{\arccos u}{\pi}.$$

Подставляем в уравнение (12) соответствующие значения уровня и аргумента (13) и приравниваем полученное выражение значению производной $\frac{dh(x)}{d(x)}$:

$$\frac{dh(x)}{d(x)} = \frac{\sin \theta}{\pi} \left(1 - \frac{\theta}{\sin \theta} u\right) = \frac{du}{d\alpha}.$$

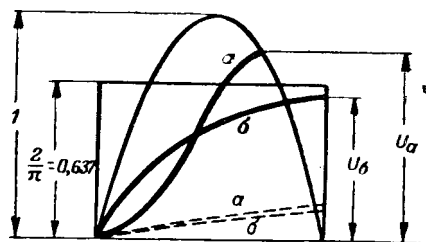


Рис. 10.

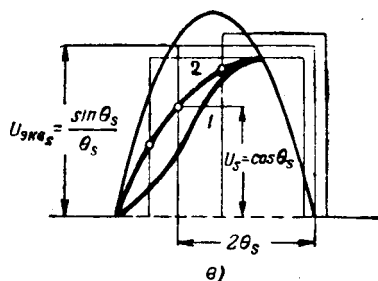
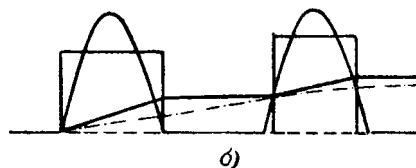
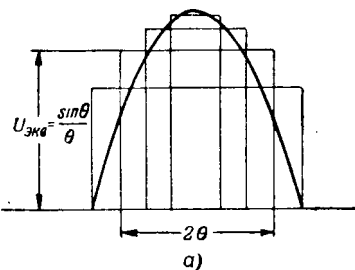


Рис. 11.

Кривая 1 — соответствует «синусоидальному» методу рассмотрения; 2 — «прямоугольному» методу рассмотрения.

Но

$$u_s = \cos \theta; \quad du = \sin \theta d\theta,$$

и мы получаем дифференциальное уравнение относительно угла отсечки

$$-\frac{d\theta}{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{\theta}{\tan \theta}\right).$$

Окончательно имеем:

$$\pi \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{1 - \frac{\theta}{\tan \theta}} = \alpha.$$

Приложение 2

При поверхностном рассмотрении может показаться, что совпадение результатов вычислений по точному «синусоидальному» методу и предлагаемому «прямоугольному»

возможно лишь при малых значениях $\beta\tau = \frac{1}{R_1 C f}$. Действительно, сравним кривые заряда конденсатора под воздействием положительной полуволны синусоиды и эквивалентного прямоугольника (рис. 10). При малых $\beta\tau$, т. е. при медленном установлении, кривые зарядов a и b почти совпадают (пунктирные кривые); при больших $\beta\tau$ (при быстром нарастании) кривые (сплошные) расхо-

дятся. Однако, в предлагаемом методе дело обстоит не совсем так. При „прямоугольном“ рассмотрении по мере нарастания напряжения на конденсаторе (независимо от того, происходит ли это внутри одного импульса или захватывает ряд импульсов) синусоидальные импульсы непрерывно заменяются эквивалентными прямоугольными импульсами. Фактически мы аппроксимируем синусоиду эквивалентными прямоугольниками (рис. 11, а). Количество аппроксимирующих прямоугольников определяется выбором числа уровней, на которые разбивался весь диапазон изменения напряжения на конденсаторе (например, от 0 до 0,95) при построении кривой установления $u = h(\alpha)$.

Если процесс установления происходит медленно (при малых $\beta\tau$), то переход от одного уровня к другому захватывает несколько периодов высокой частоты (рис. 11, б). В этом случае кривая $u = h(\alpha)$ весьма точно передает микроструктуру процесса нарастания. Если процесс установления достаточно быстр, то переход от одного уровня к другому (иначе говоря, от одного прямоугольника к другому) происходит внутри одной и той же синусоиды (рис. 11, в). Кривая внутри синусоиды не будет соответствовать истинному процессу нарастания, но конечная ее ордината, достигнутая к моменту пересечения с синусоидой, равна той, которая получалась бы под воздействием рассматриваемой синусоиды.

Сравнение результатов вычислений по точному „синусоидальному“ методу и по кривой рис. 3, проведенное для малых и больших значений параметра $\beta\tau$, показало, что ошибка не превышает 2%.

Таким образом, кривая $u = h(\alpha)$ (рис. 3) дает точную зависимость напряжения на конденсаторе в функции от дискретного числа периодов n при любом $\beta\tau = \text{const}$, или, наоборот, зависимость напряжения от постоянной времени

$\frac{1}{\beta} = R_1 C$ при $n = \text{const}$; $\tau = \text{const}$. Замена отрезков синусоид прямоугольниками отразилась лишь на процессе нарастания внутри импульсов, но не на величине напряжения к концу данного периода.

Приложение 3

Напряжение к началу $(n+1)$ -го импульса равно:

$$u'_n = u'_{n-1} [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})] e^{-a\beta\tau(1-k)} + \frac{\sin \theta}{\theta} (1 - e^{-k\beta\tau}) e^{-a\beta\tau(1-k)}.$$

Последовательно понижая индекс в правой части этой рекуррентной формулы, получаем:

$$u'_n = b \frac{\sin \theta}{\theta} (1 - e^{-k\beta\tau}) e^{-a\beta\tau(1-k)} \{ 1 + [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})] e^{-a\beta\tau(1-k)} + [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})]^2 e^{-2a\beta\tau(1-k)} + \dots + [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})]^{n-1} e^{-(n-1)a\beta\tau(1-k)} \}.$$

Выражение в фигурных скобках представляет собой геометрическую прогрессию; ее сумма равна:

$$\frac{1 - [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})]^n e^{-na\beta\tau(1-k)}}{1 - [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})] e^{-a\beta\tau(1-k)}}.$$

Окончательно получаем формулу для определения напряжения на нагрузке к началу $(n+1)$ -го импульса

$$u'_n = b \frac{\sin \theta}{\theta} (1 - e^{-k\beta\tau}) e^{-a\beta\tau(1-k)} \frac{1 - [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})]^n e^{-na\beta\tau(1-k)}}{1 - [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})] e^{-a\beta\tau(1-k)}}.$$

Приложение 4

Дифференцируем уравнение (6) и после преобразований получаем:

$$\frac{du'_n}{dn} = \left\{ u'_n - \frac{b \frac{\sin \theta}{\theta} (1 - e^{-k\beta\tau}) e^{-a\beta\tau(1-k)}}{1 - [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})] e^{-a\beta\tau(1-k)}} \right\} \ln \{ 1 - [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})] e^{-a\beta\tau(1-k)} \}.$$

Если $u'_n = F(n)$ и $\theta = \arccos F(n)$, то

$$\frac{du'_n}{dn} = \frac{dF(n)}{dn}.$$

Но

$$\frac{dF(n)}{dn} = \frac{d(\cos \theta)}{dn} = -\sin \theta \frac{d\theta}{dn},$$

и дифференциальное уравнение относительно угла отсечки запишется следующим образом:

$$-\frac{d\theta}{dn} = \left\{ \frac{\theta}{\lg \theta} - \frac{b(1 - e^{-k\beta\tau}) e^{-a\beta\tau(1-k)}}{1 - [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})] e^{-a\beta\tau(1-k)}} \right\} \cdot \frac{1}{\theta} \times \times \ln \{ [1 - b(1 - e^{-k\beta\tau})] e^{-a\beta\tau(1-k)} \}, \quad (14)$$

здесь

$$a = \frac{1}{1+\xi}; \quad b = \frac{\xi}{1+\xi}; \quad \xi = \frac{R}{R_1}; \quad \beta\tau = \frac{\tau}{aRC}; \quad k = \frac{\theta}{\pi}.$$

При заданных значениях R , R_1 , C и τ правая часть уравнения (14) является функцией лишь угла отсечки:

$$-\frac{d\theta}{dn} = f(\theta).$$

Разделяя переменные и интегрируя обе части, получаем:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{f(\theta)} = n.$$

Приложение 5

Сравнение методов производилось при следующих данных: частота воздействующей э. д. с. $\omega = 2\pi f = 5 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{сек}}$. Параметр $\beta\tau = 2; 0,6; 0,2$. Обозначим через U_0 и U — значения напряжения на конденсаторе по прошествии целого числа периодов, вычисленные соответственно по кривым И. В. Басика и по кривой рис. 3; процентная разность $\Delta = \frac{U_0 - U}{U} \cdot 100$. Как и следовало ожидать, разность Δ повышается с уменьшением параметра $\beta\tau$. Действительно, при меньших $\beta\tau = \frac{\tau}{R_1 C}$ (больших постоянных времени детектора по сравнению с длительностью периода высокой частоты) в процессе установления участвует большее количество периодов, в каждом из которых делается ошибка. При $\beta\tau = 0,2 \dots \Delta \approx 18\% (U_0 = 0,742; U = 0,63)$.

Литература

1. Н. Д. Папалекси. Über die Vorgänge in einem Wechselstromkreis mit elektrischem Ventil. Annalen der Physik, т. 39 № 15, 1912.
2. Н. С. Курбатова. Переходные процессы в цепях с вентилями. Кандидатская диссертация МЭИ, 1942.
3. И. В. Басик. Переходные устройства для комбинированных радиотелеграфных телефонных связей. Связь-техиздат, 1938.

Упрощенный расчет динамической устойчивости электрических систем

Кандидат техн. наук, доц. В. А. ВЕНИКОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Определение относительного движения роторов генераторов системы $\delta = f(t)$ при различных нестационарных режимах имеет большое практическое значение.

Достаточно указать, что все расчеты динамической устойчивости сводятся к вычислению зависимости $\delta = f(t)$.

Расчеты этого рода, проводимые обычно методом последовательных интервалов, весьма трудоемки и во избежание накапливающейся от интервала к интервалу ошибки требуют высокой тщательности вычислений.

Расчеты, проводимые с наибольшей доступной точностью (метод Лонглея), также далеко не всегда соответствуют действительности. Уже давно приходилось встречаться со случаями, когда сделанные на основании расчетов выводы о нерациональности или неприменимости того или иного мероприятия (автоматическое регулирование или разгрузка АПВ, необходимость смены масляных выключателей) опровергались практикой. Поэтому иногда приходили к выводу о нецелесообразности и даже вредности проведения подобных расчетов.

В настоящей статье рассматриваются две задачи, которые возникают при рассмотрении указанных расчетов: упрощение техники расчета и изменение подхода к анализу получаемых результатов.

Попытки упростить анализ применением графиков и номограмм делались неоднократно [Л. 1—4]. Так, в 1930 г. были предложены [Л. 1] типовые характеристики, позволяющие быстро находить трудно определяемую аналитически зависимость $\delta = f(t)$. Характеристики, построенные на основании интегрирования уравнения простейшей системы, которая состоит из станции, связанной чисто реактивным сопротивлением с шинами бесконечной мощности, могли служить основой для упрощенных методов расчета динамической устойчивости и для различных других расчетов, например, токов короткого замыкания при качаниях. Но грубые допущения, не соответствующие природе явления, при-

Обосновывается необходимость учета вариации исходных параметров и влияния неточности основных допущений в расчетах нестационарных режимов электрических систем. Рекомендуется упрощенный способ расчета, использующий специальные номограммы. Статья содержит дискуссионные моменты, по которым желательны отклики читателей.

нятые при построении этих характеристик: отсутствие учета изменений во времени реакции якоря, предположение постоянства E' (вместо $E'_d = \text{const}$)

создавали неуверенность в получаемых результатах.

Сопоставляя расчеты динамической устойчивости или токов короткого замыкания при качаниях, проведенные по упрощенному методу и по более точному методу Лонглея, часто наталкивались на случаи, когда результаты получались весьма различными не только количественно, но и качественно. На рис. 1,а приведены результаты расчета одного и того же процесса: расчеты по Лонглею показывают на выпадение из синхронизма, упрощенным методом — на устойчивость. Не менее часто имеет место и хорошее совпадение результатов обоих методов; кривые $\delta = f(t)$ и $\delta' = f(t)$ имеют одинаковый характер (рис. 1,б) и расхождение между ними обуславливается, главным образом, различной величиной начального угла; это расхождение, $\Delta\delta$, равное $\delta_0 - \delta'_0$, остается почти неизменным в течение всего процесса.

Поскольку в литературе до настоящего времени не указывалось каких-либо приемов установления точности упрощенного метода, он оценивался только как очень грубое приближение. Еще меньшая уверенность в точности результатов получалась при попытках распространить упрощенные методы, основанные на применении типовых характеристик и допущении $E' = \text{const}$, на систему, состоящую из двух станций конечной мощности [Л. 2—4].

Преобразование исходных уравнений такой системы к виду, позволяющему воспользоваться типовыми характеристиками, требовало слишком громоздких вычислений. Все это привело к тому, что эти упрощенные методы не нашли должного применения в инженерной практике. Однако, эти методы, если только правильно оценивать их результаты, могут полностью удовлетворять всем требованиям, возникающим при решении инженерных задач, а широкое приме-

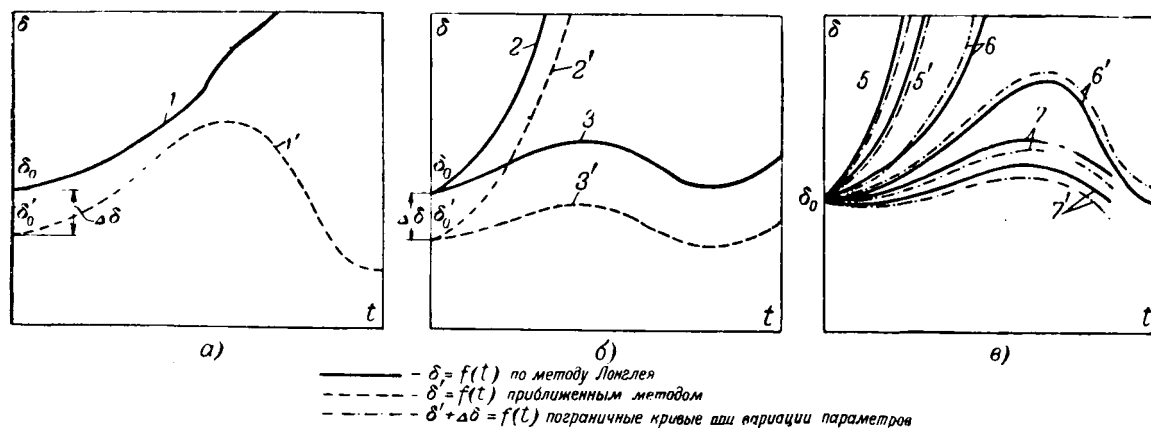


Рис. 1. Сравнение результатов расчета $\delta = f(t)$ точным и приближенным методом для системы, состоящей из двух станций конечной мощности и нагрузки $\delta = \delta_{12}$; $\delta' = \delta_{12}'$.

нение номограмм, охватывающих все вычислительные операции (см. приложение), делает все расчеты весьма быстрыми.

Оценка точности приближенного метода не должна сводиться к простому сопоставлению с результатами метода, учитывающего больше факторов и потому рассматриваемого как «более точный». Следует учесть определенную условность результатов любого из этих методов, и то, что начальные условия (угол δ_0 , э. д. с. и пр.) и параметры системы: реактивные сопротивления генераторов, трансформаторов, линий, эквивалентные полные сопротивления нагрузок известны лишь с некоторой, относительно невысокой, степенью точности. Неточность имеет место как за счет наличия определенного допуска в значениях параметров, сообщаемых заводами, так и за счет наличия влияющих, но не учитываемых в расчете факторов (насыщение, условность учета нагрузки и т. д.). То обстоятельство, что короткое замыкание практически не бывает «глухим», а сопротивление дуги и переходные сопротивления не учитываются, делает весьма условными значения аварийного шунта, вводимого при расчетах несимметричных коротких замыканий. Действительное активное сопротивление в этом шунте может отличаться от расчетного на 100 ÷ 200 %.

Отклонение величины суммарного полного сопротивления системы в силу указанных причин (взаимного или собственного) часто может составлять $\pm(6 \div 10) \%$, достигая в неблагоприятных случаях $\pm(15 \div 20) \%$. Такие параметры, как постоянные времени генератора и возбудителя, начальные значения э. д. с. и др., известны, особенно, если учесть влияние насыщения, также с не очень большой степенью точности. Дать какой-либо точный аналитический метод оценки влияния этих погрешностей весьма затруднительно. Но ориентировочно к их оценке можно подойти так: произведя методом Лонг-лея серию расчетов и изменяя в каждом расчете один из перечисленных приближенно известных параметров на величину его вероятного отклонения, получают семейство характеристик $\delta = f(t)$ (или каких-либо других переменных).

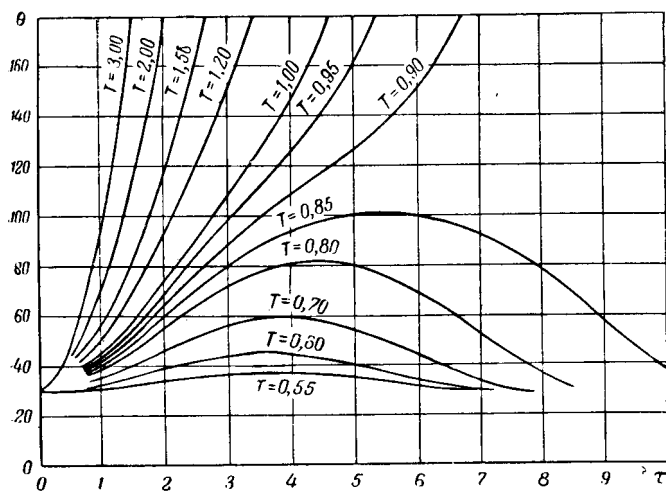
Любая из этих характеристик с той или иной вероятностью показывает поведение системы при данной аварии. Оставляя пока открытым вопрос о степени этой вероятности¹, можно установить, что в зависимости от ряда факторов, а также от того, устойчива система или находится на пределе устойчивости, или же, наоборот, неустойчива; расхождение характеристик этого семейства между собой будет различным (рис. 1, в, характеристики 5, 6, 7). Легко показать, что при прочих равных условиях наибольшее расхождение должно иметь место в случае нахождения системы на пределе устойчивости, где малейшее изменение возмущающих факторов может менять не только количественно, но и качественно характер относительного движения роторов генераторов. В результате такого расчета с вариацией параметров при какой-либо аварии для каждого момента времени будут получены не одно, а несколько значений угла δ и соответственно несколько значений тока, мощности и др. Значения, отвечающие крайним отклонениям исходных параметров, наиболее существенны, так как между этими двумя значениями лежит истинное значение переменных.

Условность исходных данных следует учесть и при оценке точности расчетов по упрощенным методам, например, при расчетах с помощью типовых характеристик.

На рис. 2 приведено семейство типовых характеристик, построенных для заданного θ_0 [Л. 1], каждая из которых соответствует определенному характеристическому параметру T , являющемуся в свою очередь функцией соотношения между определенными параметрами системы в нормальном и аварийном или послеаварийном режиме (см. приложение).

Сравнение какой-либо конкретной характеристики, соответствующей данному параметру T ,

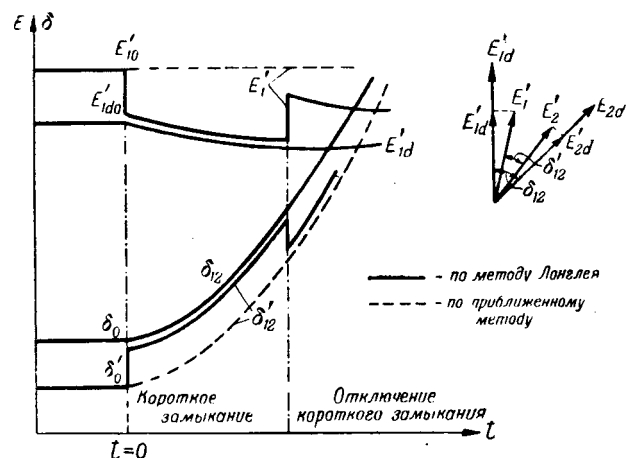
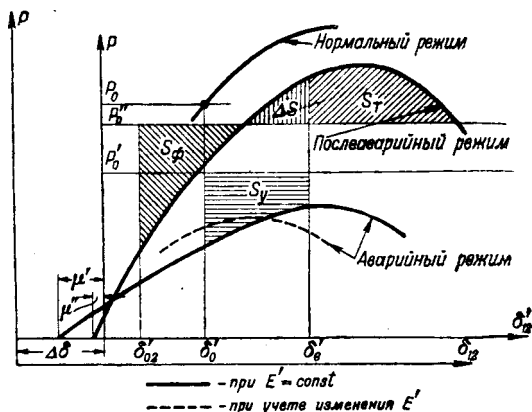
¹ Изменяя поочередно только один из приближенно известных параметров и не исследуя влияния различных комбинаций отклонения параметров, конечно, не получают ответа на вопрос, какова вероятность, что именно данная кривая будет характеризовать процесс при данных условиях. Этот вопрос может явиться предметом особого изучения.

Рис. 2. Типовые характеристики $\theta = f(\tau)$.

с кривой, полученной для этого же случая путем расчета по методу Лонглея, разумеется, обнаруживает неизбежные расхождения, поскольку в точном методе учтены факторы, не отраженные в приближенном (рис. 1,а, характеристики 1 и 1'). Эти расхождения иногда (рис. 1,а) могут быть огромны, но вовсе не указывают на практическую непригодность приближенных методов. Детальное исследование показывает, что в таких случаях и при расчете методом Лонглея результаты будут весьма условны, так как малейшее изменение исходных данных будет резко менять характер процесса (рис. 1,б, характеристики 6 и 6').

Проводя расчет упрощенным методом не только для данного расчетного параметра T , а и для некоторых значений $T \pm \Delta T$ и $T - \Delta T$ (соответствующих возможным наибольшим вариациям исходных данных), получают, так же как и в точном методе, семейство характеристик. Это семейство будет в большинстве случаев весьма близко совпадать с семейством характеристик, полученным в результате расчетов методом Лонглея, но с учетом возможных вариаций исходных данных. В обоих случаях расхождение отдельных характеристик данного семейства между собой будет тем больше, чем ближе система к пределу устойчивости. Величина ΔT должна быть выбрана в зависимости от целей расчета и в зависимости от того, с какой степенью точности известны те или иные исходные данные, что в свою очередь зависит от того, рассматривается поведение вновь проектируемой системы или системы существующей. Строгое обоснование выбора величины ΔT , исходя из вероятности отклонений отдельных параметров с учетом их одновременного влияния, представляет самостоятельную задачу, которая решается методами теории вероятности с использованием статистических и экспериментальных данных. Но можно подойти к этой задаче и упрощенно.

Большое количество сравнительных расчетов показывает, что изменение обобщенного параметра T на $\pm 10 \div 15\%$ при расчетах прибли-

Рис. 3. Характер изменений во времени E' , $E'd$, δ и δ' .Рис. 4. Характер зависимостей $P = f(\delta')$, $P = f(\delta)$.

женным методом дает примерно такие же изменения в характере относительного движения, что и учет влияния возможных колебаний исходных данных около истинного их значения, при расчете по Лонглею. Результаты определения зависимости $\delta = f(t)$ по обоим методам, представленные не в виде одной характеристики, а в виде семейства характеристик, во всех случаях движения системы как устойчивого, так и неустойчивого будут совпадать весьма близко (рис. 1,б). Совпадение это не является случайным. Действительно, допущение постоянства E' не является обоснованным: при коротком замыкании величина E' уменьшается, приближаясь к E'_d , которая в свою очередь постепенно затухает (рис. 3). Это должно было бы, уменьшая значение мощности (рис. 4), увеличивать ускорение генератора. Однако, одновременно с уменьшением мощности происходит рост угла между э. д. с. от величины δ' до $\simeq \delta$, что равносильно сдвигу характеристики, приводящему к уменьшению площади ускорения.

Анализ большого количества расчетных материалов показывает, что благодаря наличию противоположно влияющих факторов в большинстве расчетных случаев площадь ускорения при расчете по E' оказывается близкой к аналогичной площади, определяемой, исходя из E'_d .

В конечном счете для режима короткого замыкания появляется тенденция к совпадению

результатов приближенного (при вариации параметров) и точного методов расчета. Аналогично можно показать, что такие упрощенные расчеты режимов после выключения короткого замыкания дают значительно худшую, но все же удовлетворительную сходимость с результатами точного метода.

Выводы. Расчеты зависимости $\delta = f(t)$ должны производиться не только для одного „исходного“ значения расчетных параметров и начальных условий, но и для величин, отличающихся от них на $\pm \Delta T$, где ΔT определяется точностью исходных данных.

Степень устойчивости системы должна характеризоваться не только видом полученной характеристики, но и величиной расхождения полученных характеристик между собой. Надлежит иметь в виду, что фактическое поведение системы зависит и от неучтенных факторов (наличие насыщения и уменьшение реактивного сопротивления, увеличение активного сопротивления при росте тока, наличие регуляторов напряжения, потерь в генераторах, уменьшение механического вращающего момента первичного двигателя), способствующих сохранению устойчивости.

Приближенные расчеты с вариацией параметров следует проводить по упрощенному методу, применяя его во всех случаях предварительного анализа работы существующих систем и проектирования новых.

При пользовании существующими типовыми характеристиками (рис. 2) из семейства, отвечающих данному начальному значению угла θ_0 , следует выбирать две пограничные характеристики, соответствующие расчетному параметру $T \pm 10 \div 15\%$.

Расчеты по приближенному методу, быстро проводимые по предложенным автором номограммам, могут быть полезны и при более точных расчетах (по Лонглю), как предварительные.

По указанному методу может рассчитываться не только динамическая устойчивость, но и любые другие нестационарные режимы системы.

Дальнейшее развитие метода, намеченного в настоящей работе, должно составить задачу, которую следует дополнительно исследовать.

Приложение

Приведение любой системы к схеме станция—шины бесконечной мощности производится по предложенным автором номограммам следующим образом: известными приемами преобразования (рис. 5) система приводится к схеме, содержащей две станции конечной мощности, связанные друг с другом сетью произвольной конфигурации с любым числом нагрузок. В этой схеме для нормального, аварийного и послеаварийного режима² определяются собственные и взаимные полные сопротивления станций

$$Z'_{11} = R'_{11} + jX'_{11}; Z'_{12} = R'_{12} + jX'_{12}; Z'_{22} = R'_{22} + jX'_{22},$$

а также э. д. с. за переходным сопротивлением E'_1 и E'_2 .

² Аварийный режим отмечается штрихом ', послеаварийный — двумя штрихами ''.

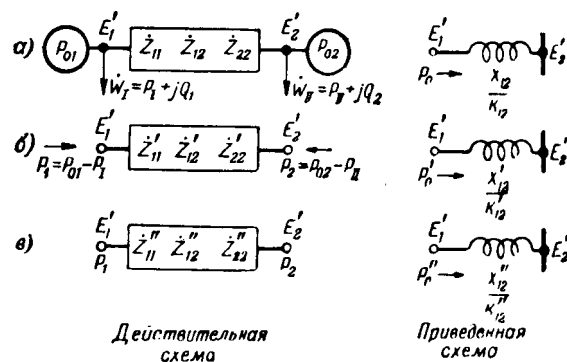


Рис. 5. Расчетные схемы систем.

а — нормальный режим; б — аварийный режим; в — послеаварийный режим.

Движение ротора эквивалентного генератора каждой станции определяется уравнениями

$$M_1 \frac{d^2 \delta'_1}{dt^2} = P_1 - \frac{E'_1 E'_2}{Z'_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{E'_1 E'_2}{Z'_{12}} \sin (\delta'_{12} - \alpha_{12}), \quad (1)$$

$$M_2 \frac{d^2 \delta'_2}{dt^2} = P_2 - \frac{E'_2 E'_1}{Z'_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{E'_1 E'_2}{Z'_{12}} \sin (\delta'_{12} + \alpha_{12}), \quad (1a)$$

где $\delta'_{12} = \delta'_1 - \delta'_2$.

Уравнение относительного движения, полученное как разность (1) и (1a), может быть после преобразований записано так:

$$M_0 \frac{d^2 \theta}{dt^2} = P'_0 - \frac{E'_1 E'_2}{X'_{12}} K'_{12} \sin \theta \text{ или } \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \sin \theta = T',$$

здесь $M_0 = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}$, где M_1 и M_2 — постоянные инерции станций 1 и 2;

$$\theta = \delta'_{12} + \mu; P'_0 = \frac{M_0}{M_2} \left[A - B \frac{K'_{11}}{X'_{11}} + E'_2{}^2 \frac{K'_{22}}{X'_{22}} \right],$$

где $A = mP_1 - P_2$; $B = mE_1'^2$; $m = \frac{M_2}{M_1}$;

$$\tau = t \sqrt{\frac{314 K'_{12} E'_1 E'_2}{M_0 X'_{12}}}; \quad T' = \frac{P'_0 X'_{12}}{E'_1 E'_2 K'_{12}}.$$

Коэффициенты K_{11} , K_{12} , μ и K_{22} , являющиеся функцией $\frac{R}{X}$ и m , быстро определяются по номограммам на основании выражений

$$\mu = \arctg \frac{R_{12}}{X_{12}} \left[\frac{1-m}{1+m} \right];$$

$$K_{12} = \sqrt{\frac{1 + m^2 + 2m \cos 2 \left[\arctg \frac{R_{12}}{X_{12}} \right]}{(1+m)^2 \left[1 + \left(\frac{R_{12}}{X_{12}} \right)^2 \right]}}.$$

Фиктивная механическая мощность P_0 , угол μ , коэффициенты K_{12} , $\frac{K_{11}}{X_{11}}$, $\frac{K_{22}}{X_{22}}$ зависят от конфигурации системы и меняются при изменении режима.

Характеристики мощности $P = f(\delta'_{12})$ для приведенной системы приобретают несколько необычный вид, показанный на рис. 4.

Приравнявая площадку уравнения S_v и площадку торможения S_T согласно выражению

$$\int_{\delta'_0}^{\delta'_M} P'_0 - \frac{E'_1 E'_2}{X'_{12}} K'_{12} \sin \theta' = \int_{\delta'_e}^{\delta'_M} P'_0'' - \frac{E'_1 E'_2}{X'_{12}''} K'_{12}'' \sin \theta'', \quad (2)$$

находим графическим путем угол выключения, подбирая δ , так, чтобы S_y и S_T были равны, или аналитически

$$\delta_s = \arccos \frac{\left[\delta'_m - \frac{P'_0}{P''_0} \delta'_0 + \left(\frac{P'_0}{P''_0} - 1 \right) \delta'_s \right] \sin(\delta'_0 + \mu) - r_1 \cos(\delta'_0 + \mu') + r_2 \cos(\delta'_m - \mu'')}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\mu'' - \mu')}} - \arctg \frac{r_2 \sin \mu'' - r_1 \sin \mu'}{r_2 \cos \mu'' - r_1 \cos \mu'} \quad (3)$$

$$\text{где } r_1 = \frac{X_{12} P''_0 K'_{12}}{X'_{12} P_0 K_{12}}; \quad r_2 = \frac{X_{12} P''_0 K''_{12}}{X''_{12} P_0 K_{12}}.$$

Весьма сложное уравнение (3) может быть приближенно решено с помощью номограммы, дающей ориентировочное значение угла выключения и построенной согласно выражению

$$\delta'_s \approx \arccos \frac{\left(\pi - \arcsin \frac{\sin \delta'_0}{r_2} - \delta'_0 \right) \sin \delta'_0 - r_1 \cos \delta'_0 + r_2 \cos \left(\pi - \arcsin \frac{\sin \delta'_0}{r_2} \right)}{r_2 - r_1} \quad (4)$$

Результаты определения угла по выражениям (3) и (4) тем ближе совпадают, чем меньше μ' и μ'' и чем ближе единице отношение $\frac{P'_0}{P''_0}$.

Для простейшей системы станция — шины бесконечной мощности это совпадение будет полным (в этом случае $r_1 = \frac{X_{12}}{X'_{12}}$ и $r_2 = \frac{X_{12}}{X''_{12}}$).

Довольно часто возникает задача нахождения изменения угла δ' после отключения короткого замыкания, при угле $\delta' > \delta_s$ она так же легко решается применением номограмм.

Для этого из серии типовых характеристик $\Theta = f(\tau)$ (рис. 2) надлежит выбрать характеристику, отвечающую некоторому фиктивному начальному углу δ'_{02} и характеристическому параметру

$$T'' = \frac{P''_0 X''_{12}}{E'_1 E'_2 K''_{12}}.$$

Фиктивный начальный угол δ'_{02} должен быть выбран таким, чтобы фиктивная площадка ускорения $S_\varphi = \Delta S$ (рис. 3) при фиктивном движении от δ'_{02} до δ_s , происхо-

дящем соответственно характеристике $P'' = \varphi(\delta)$, была равна действительной площадке ускорения, получающейся при действительном движении от δ_0 до δ_s по характеристике $P' = \varphi(\delta)$.

Графические или аналитические решения, требующие много времени, рационально заменять номограммами, дающими сразу значения δ_{02} .

Переход от фиктивного времени, в функции которого построены типовые характеристики $\Theta = f(\tau)$ (рис. 2), легко осуществляется согласно номограмме, построенной по уравнению

$$t = \tau \sqrt{\frac{M_0 X'_{12}}{E'_1 E'_2 K'_{12} \cdot 314}}.$$

Литература

1. I. H. Summers, J. B. Mc Clure. Progress in the Study of System Stability. Trans. AIEE, т. 49, стр. 132, 1930.
2. D. G. C. Dahl. Electric Power Circuits, т. II, Mc Giraw-Hill, 1938.
3. H. L. Byrd, S. R. Pritchard. Solution of the Twomachine Stability Problem, GER, т. 36, стр. 81, 1933.
4. Д. Е. Трофименко. Расчет динамической устойчивости по типовым кривым. Электричество, № 9, стр. 52, 1945.



Затухание волн в кабелях

Кандидат техн. наук Д. В. РАЗЕВИГ

Московский энергетический институт им. Молотова

До последнего времени основные работы по затуханию производились на воздушных линиях, и вопрос затухания волн в кабелях остался почти неисследованным.

Вместе с тем, учет снижения амплитуды волны после ее пробега вдоль кабеля в ряде случаев представляется необходимым. Особенно это относится к схемам защиты от атмосферных перенапряжений вращающихся машин, работающих на воздушные линии через кабельные вставки. Затухание волн в таких кабельных вставках может оказать существенную помощь схеме защиты. Поэтому настоящее исследование было предпринято именно в связи с работой по защите вращающихся машин от атмосферных перенапряжений, проведенной кафедрой «Техники высоких напряжений» МЭИ под руководством Л. И. Сиротинского в 1945—1947 гг.

Расчет затухания волны в кабеле под действием поверхностного эффекта. Если в начале кабеля приложено напряжение $U_0(t)$, то, как известно, имеет место телеграфное уравнение

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = (pRC + p^2 LC)U, \quad (1)$$

причем активная проводимость G принята равной нулю, что близко к действительности при небольших напряжениях.

Непосредственное интегрирование уравнения (1) трудно, так как при интересующих нас кратковременных импульсах активное сопротивление R является сложной функцией времени [Л. 1]. При этом обычно можно получить R не в функции формы кривой $U_0(t)$, а в зависимости от частоты установившихся чисто синусоидальных колебаний.

Задачу можно решить следующим образом: с помощью интеграла Фурье разложить $U_0(t)$ на бесконечную сумму синусоидальных колебаний, для каждого из которых применить известное для синусоидального напряжения решение, которое имеет вид: $U(t, x) = U_{\max} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-(\alpha + j\beta)x}$. Искомый результат получится в результате суммирования (интегрирования по ω) частных решений. При этом, очевидно, и α и β будут функциями ω . Методика применения этого способа вычисления затуханий приведена в приложении.

Изложен метод расчета затухания импульсной волны в кабелях, не имеющих утечки на землю, основанный на разложении импульса с помощью интеграла Фурье. Приведены результаты экспериментального исследования затухания в кабеле, позволившего выявить роль диэлектрических потерь. Даны графики для определения затухания в кабелях напряжением 3—10 кВ и длиной 50—400 м.

Сделаем расчет величины возможных затуханий под влиянием поверхностного эффекта в кабеле, на котором производилось экспериментальное изучение затуханий. Это нормальный трехфазный кабель 6 кВ. Сечение жил его 50 мм², длина 188 м. Для простоты будем исходить из движения волны по одной жиле при отсутствии тока в двух других фазах и возврате тока через оболочку. В этом случае активные потери будут обусловлены сопротивлением оболочки и одной жилы кабеля. Пренебрегаем несовпадением осей жилы и оболочки, что равносильно пренебрежению несимметричностью поля внутри кабеля. Тогда и для жилы и для оболочки будут справедливы формулы, выведенные для поверхностного эффекта в круглом проводе. Для оболочки в качестве радиуса провода необходимо, очевидно, брать внутренний ее радиус, так как поле сосредоточено внутри кабеля и ток в оболочке стягивается именно к ее внутренней поверхности.

На рис. 1 показаны графики зависимости коэффициентов α и β от ω для этого кабеля, а на рис. 2—график $e^{-\alpha l} = f(\omega)$ для длины $l = 188$ м и приближенная замена ее ступенчатой кривой. На рис. 3 в графической форме показаны результаты расчета затуханий для волн, имеющих фронт 0,3 мкс и длину в 10 мкс и 1 мкс.

При выборе формы волны учитывалось, что при исследовании схем защиты вращающихся машин большой интерес представляет определение затухания импульсной волны, имеющей крутой фронт (подпор на индуктивности) и различную длину от одной до десятков микросекунд.

Экспериментальное изучение затуханий. Объектом исследования являлся описанный выше кабель 6 кВ длиной 188 м. В качестве источника напряжения применялся одноступенчатый импульсный генератор, имеющий емкость в уда-ре от 0,15 до 0,9 мкФ, позволяющий давать волну напряжением до 60 кВ. В большинстве случаев генератор разряжался непосредственно на кабель, без демпфирующих сопротивлений, причем для получения хорошей формы волны кабель включался на клеммы генератора весьма коротки-

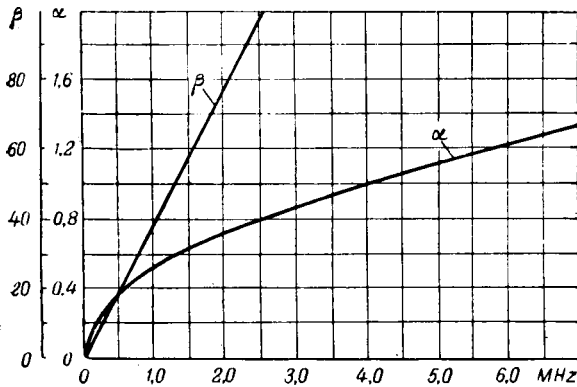


Рис. 1. Зависимость коэффициентов α и β (на 1 км длины кабеля) от частоты для кабеля 6 кВ, 3×50 мм².

ми соединительными проводниками. Для этого оба конца кабеля были заведены в помещение, в котором установлены импульсный генератор и катодные осциллографы, а остальная часть кабеля была оставлена на барабане вне помещения.

Расчетное волновое сопротивление испытуемого кабеля равно 11,6 Ω для случая движения волны по трем фазам и 22,5 Ω для случая движения волны по одной фазе при отсутствии тока в двух других фазах.

Экспериментальные величины волнового сопротивления (определенные по коэффициенту преломления на конце кабеля при включении на конце активных сопротивлений) оказались зависящими от формы и амплитуды волны, при которой производились измерения, и колебались соответственно от 10 до 12,6 Ω и от 21,3 до 23,8 Ω .

Схема экспериментальной установки для определения затуханий приведена на рис. 4. Напряжение в начале и конце кабеля измерялось одновременно одинаковыми катодными осциллографами.

Коэффициент деления омических делителей напряжения регулировался изменением величины $R_{дел}$, причем она всегда оставалась больше 750 Ω , чтобы с достаточной точностью (до 1%) имитировать условия открытого конца. Коэффициент затухания определялся из отношения

$$\eta = \frac{U_{кон}}{2U_{нач}}. \quad (2)$$

В связи с затруднениями при разделке кабеля все эксперименты при больших напряжениях (20 ÷ 60 кВ) производились при параллельном соединении всех трех жил. Измерения при более низких напряжениях показали, что величина затухания практически от соединения фаз не зависит, так что полученные результаты применимы и для случая движения волны по одной жиле. Это явление может быть объяснено тем, что, хотя активное сопротивление жил и падает при параллельном соединении, но из-за наличия сопротивления оболочки суммарное сопротивление падает меньше, чем в три раза. В то же время уменьшается и волновое сопротивление кабеля. Процессы уменьшения активного сопротивления и волнового сопротивления кабеля влияют на затухание в разные стороны и компенсируют друг друга.

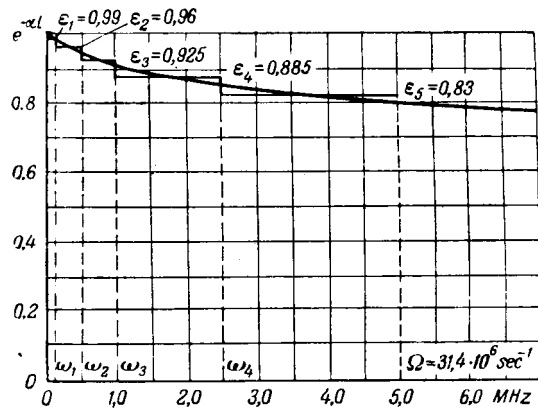


Рис. 2. Замена $e^{-\alpha l}$ ступенчатой кривой (длина кабеля $l = 188$ м).

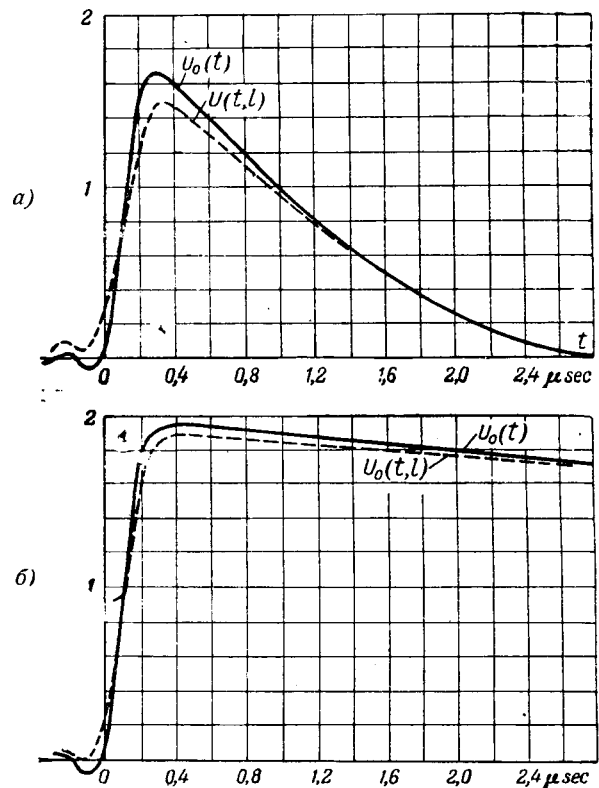


Рис. 3. Затухание волн в кабеле ($l = 188$ м) под влиянием поверхностного эффекта.

а — длина волны $\tau_\phi = 1$ μ sec; $\tau_\phi = 0,3$ μ sec;

$$\eta = \frac{U(t, l)_{\max}}{U_0(t)_{\max}} = 0,86;$$

б — $\tau_\phi = 10$ μ sec; $\tau_\phi = 0,3$ μ sec; $\eta = 0,97$.

На рис. 5 приведены осциллограммы, характеризующие влияние длины волны на величину затуханий для напряжения 40 кВ, а на рис. 6 — кривые зависимости затухания от длины волны и от напряжения, построенные на основании аналогичных осциллограмм. При напряжениях меньше 25 кВ зависимость затухания от напряжения не обнаружена. Точки на рис. 6 соответствуют величинам затухания, полученным расчетным путем. Как видно, они довольно точно легли на кривую, соответствующую напряжению 25 кВ. Это подтверждает, что при напряже-

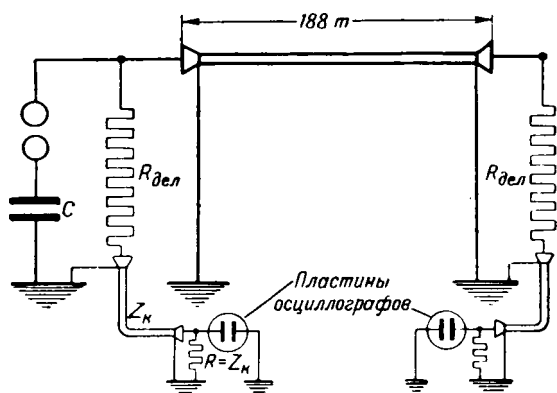


Рис. 4. Схема для экспериментального определения затуханий.

ниях ниже 25 кВ затухания в кабеле полностью определяются поверхностным эффектом, и лишь при высоких напряжениях существенную роль начинают играть диэлектрические потери в изоляции кабеля.

Результаты предыдущего анализа можно распространить и на 6-кВ кабели других сечений. Действительно, коэффициент затухания зависит от произведения радиуса жилы на волновое сопротивление кабеля, а это произведение приблизительно постоянно для кабелей всех сечений данного класса напряжения.

При сравнении кабелей 3; 6 и 10 кВ одинаковых сечений оказывается, что в среднем волновое сопротивление кабелей 3 кВ в 1,6 раза меньше, а кабеля 10 кВ — в 1,3 раза больше волнового сопротивления кабеля 6 кВ. Что касается напряжений, при которых начинаются ионизационные процессы в изоляции, то для кабелей указанных выше напряжений они близки друг к другу, так как градиенты в изоляции этих кабелей меняются в довольно узких пределах. Таким образом, после внесения соответствующих поправок кривые рис. 6 применимы для приближенной оценки затухания в кабелях 3 и 10 кВ.

Для того, чтобы применить полученные результаты для определения затухания на произвольной длине кабеля, предположим, что для импульсов справедливо выражение, аналогичное решению телеграфного уравнения для гармонических колебаний:

$$U(x, t) = U_0(t) e^{-\alpha_u x}, \quad (3)$$

где α_u — коэффициент затухания импульса, который зависит от формы и амплитуды напряжения. Величина α_u , подсчитанная на основании рис. 6, приведена на рис. 7 в функции длины и амплитуды падающей волны. По рис. 7 можно определить снижение амплитуды волны, пробежавшей вдоль кабеля любой длины, но не очень сильно отличающейся от 180 м (50 ÷ 400 м).

Выводы. 1. При напряжениях порядка 20 ÷ 25 кВ и меньше затухание волн в кабелях 3 ÷ 10 кВ определяется исключительно активным сопротивлением жил и оболочки и может быть подсчитано теоретически.

При больших напряжениях значительную

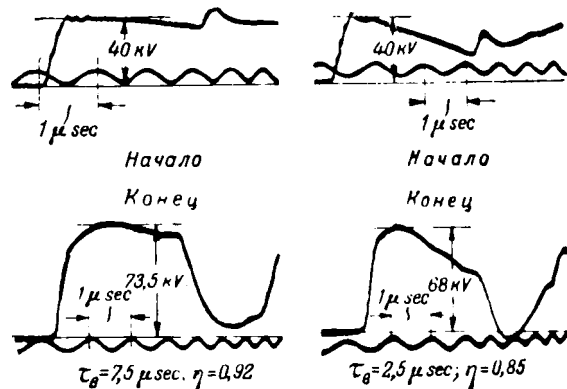


Рис. 5. Осциллограммы, показывающие зависимость затухания от длины волны при напряжении 40 кВ.

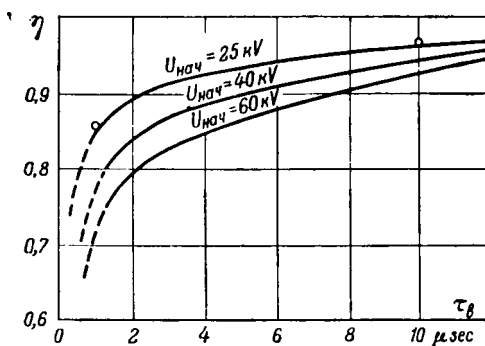


Рис. 6. Зависимость затухания ($\eta = \frac{U_{\text{кон}}}{2U_{\text{нач}}}$) от длины волны и напряжения.

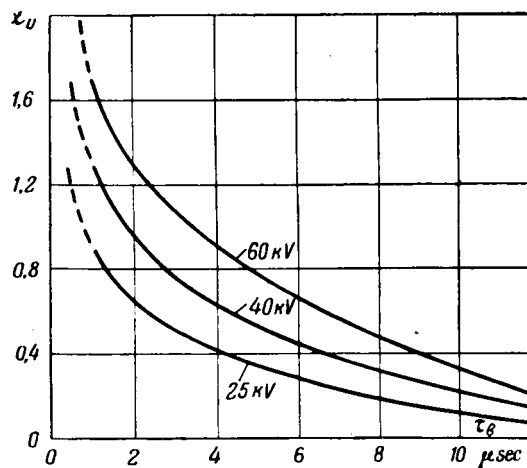


Рис. 7. Зависимость коэффициента затухания α_u (на 1 км) от длины волны и напряжения.

роль играют диэлектрические потери в изоляции кабеля.

2. Затухание практически не зависит от числа фаз, участвующих в распространении волны.

3. Затухание практически не зависит от сечения кабеля.

4. Для практических расчетов затухания крутых волн в кабелях длиной 50 ÷ 400 м можно пользоваться кривыми рис. 7 и уравнением (3). При этом для кабелей 3 кВ ординаты кривых следует умножать на коэффициенты 1,6, а для кабелей 10 кВ — делить на 1,3. Для кабелей 3 и 10 кВ полученные результаты являются приближительными.

Приложение

Применение интеграла Фурье для вычисления затухания в кабеле под действием поверхностного эффекта. Как известно, разложение функции с помощью интеграла Фурье имеет вид:

$$U_0(t) = Re \left\{ \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} U_0(t) e^{-j\omega t} dt \right] e^{j\omega t} d\omega \right\}. \quad (4)$$

Нас интересует, главным образом, разложение экспоненциального импульса $2(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t})$. Однако, целесообразно пойти на некоторые упрощения формы волны с тем, чтобы в результате интегрирования получить простые или имеющиеся в таблице функции. Как указывает Samulon [Л. 3], наиболее простые результаты получаются в случае, если экспоненту $2e^{-\alpha t}$ заменить другой функцией $F(t)$, подчиняющейся следующим условиям:

$$\left. \begin{aligned} -\infty < t < 0, \quad F(t) &\equiv 0, \\ 0 < t < \tau, \quad F(t) &= \left(2 - \frac{t}{\tau}\right), \\ \tau < t < 3\tau, \quad F(t) &= \frac{1}{4} \left(\frac{t}{\tau} - 3\right)^2, \\ 3\tau < t < \infty, \quad F(t) &\equiv 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

здесь τ — время, в течение которого экспонента снижается до половины амплитуды.

Так как интегрирование по ω в бесконечных пределах представляет значительные неудобства, можно верхний предел интегрирования ограничить некоторой величиной Ω , которую следует выбирать таким образом, чтобы в пределах желаемой точности не искажать форму исходной кривой.

Практически даже для весьма крутых волн с фронтом в $0,3 \mu\text{с}$ ограничение верхнего предела интегрирования величиной $\Omega = 10\pi \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ обеспечивает аппроксимацию исходной кривой с точностью в 1–2%.

Подставляя значения функции $F(t)$ в различные интервалы времени согласно уравнению (5) в формулу интеграла Фурье, после ряда преобразований получим:

$$\begin{aligned} F_{\Omega}(t) = & \frac{1}{\pi} \left(2 - \frac{t}{\tau}\right) \text{Si}(\Omega t) + \left(\frac{t-\tau}{2\tau}\right)^2 \frac{1}{\pi} \text{Si}[\Omega(t-\tau)] - \\ & - \left(\frac{t-3\tau}{2\tau}\right)^2 \frac{1}{\pi} \text{Si}[\Omega(t-3\tau)] + \frac{t-\tau}{4\tau^2} \cos \frac{[\Omega(t-\tau)]}{\pi\Omega} - \\ & - \frac{1}{\tau} \frac{\cos(\Omega\tau)}{\pi\Omega} - \frac{t-3\tau}{4\tau^2} \frac{\cos[\Omega(t-3\tau)]}{\pi\Omega} + \\ & + \frac{\sin(\Omega\tau)}{2\tau^2\Omega^2\pi} \cos[\Omega(t-3\tau)]. \end{aligned} \quad (6)$$

При увеличении Ω $F_{\Omega}(t)$ будет все более точно приближаться к $F(t)$.

В этой формуле $\text{Si}(\Omega t)$ есть так называемая „синус-функция“, определяемая уравнением

$$\text{Si}(\Omega t) = \int_0^{\Omega t} \frac{\sin Z}{Z} dZ.$$

Численные значения синус-функции приведены во многих математических справочниках (например [Л. 4]) и поэтому пользование уравнением (6) представляет лишь вычислительные трудности.

Для того чтобы получить разложение интересующего нас экспоненциального импульса $2(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t})$, необходимо взять разность разложений двух функций $F(t)$, имеющих разные τ (одно, соответствующее длине волны, а другое — фронту волны).

Для того чтобы применить полученное разложение импульса в ряд гармонических колебаний, напомним решение

телеграфного уравнения для синусоидального напряжения $U(t) = e^{j\omega t}$, которое, как известно, имеет вид:

$$U(t, x) = e^{j\omega t} \cdot e^{-\gamma x}, \quad (7)$$

или

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot j\omega C}. \quad (8)$$

Выразив R и L в виде функции от ω согласно теории поверхностного эффекта для круглого провода [Л. 1] и учтя, что в нашем случае спектр частот простирается до $\Omega = 31,4 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$, а еще при $\omega = 10^5 \text{ сек}^{-1}$ справедливо неравенство $\sqrt{\omega \mu \rho} \cdot r > 10$, для коэффициентов α и β после ряда преобразований получим:

$$\alpha = \frac{\alpha \sqrt{2}}{4 Z_{\kappa}} \sqrt{\omega}; \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\omega}{v} + \frac{\alpha \sqrt{2}}{4 Z_{\kappa}} \sqrt{\omega}, \quad (10)$$

где

$$\alpha = \frac{\sqrt{\omega \mu}}{2\pi r \kappa};$$

v — скорость распространения волны вдоль идеального кабеля ($R=0$); Z_{κ} — волновое сопротивление идеального кабеля.

Применив полученное решение телеграфного уравнения для каждого элементарного гармонического колебания и проинтегрировав по ω , получим выражение для напряжения в произвольной точке x кабеля в функции времени

$$U(t, x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{j(\omega t - \beta x)} \cdot e^{-\alpha x} \cdot d\omega \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(t) e^{-j\omega t} \cdot dt. \quad (11)$$

Уравнения (9) и (10) позволяют для каждого τ получить β и $e^{-\alpha x}$ в функции от ω . Обычно зависимость β от ω получается практически линейная, что физически соответствует тому, что внутреннее полное сопротивление проводника остается много меньше наружного, и скорости распространения всех гармонических остаются равными друг другу. В таком случае наличие члена $e^{-j\beta x}$ означает лишь сдвиг начала отсчета времени на время пробега волной пути x . Искажения взаимного расположения гармоник не происходит, и член $e^{-j\beta x}$ можно не учитывать. Для дальнейшего упрощения интегрирования можно $e^{-\alpha x}$ заменить ступенчатой кривой, на каждом участке которой $e^{-\alpha x}$ может рассматриваться постоянной и равной некоторой величине ε_n . Тогда наш интеграл распадается на сумму интегралов вида:

$$\frac{1}{\pi} \int_{\omega_{n-1}}^{\omega_n} \varepsilon_n e^{j\omega t} \cdot d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt, \quad (12)$$

причем ω_n меняется от 0 до Ω . Каждый такой интеграл можно представить в виде суммы двух интегралов:

$$\frac{\varepsilon_n}{\pi} \int_{\omega_{n-1}}^{\omega_n} = \frac{\varepsilon_n}{\pi} \left(\int_0^{\omega_n} - \int_0^{\omega_{n-1}} \right). \quad (13)$$

Для функции $F(t)$ интеграл такого типа был вычислен выше и обозначен $F_{\omega}(t)$. Таким образом,

$$F(t, x) = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) F_{\omega_1}(t) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) F_{\omega_2}(t) + \dots + \varepsilon_n F_{\omega_n}(t). \quad (14)$$

Чтобы получить решение для импульса $2(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t})$, необходимо взять разность двух таких решений, имеющих разные τ .

Литература

1. К. А. Круг. Основы электротехники, т. II, 1938.
2. S. Szpor. Skin-Effect in Current Impulses Due to Lightning. CIGRE, № 323, 1946.
3. H. Samulon. Spannungstoss und Fourierspectrum in der Hochspannungstechnik. Bull. ASE, № 10, 1943.
4. Jahnke, Emden. Funktionstabellen mit Formeln und Kurven, 1943.

Комплексное применение электрической энергии в сельскохозяйственном производстве

Кандидат с.-х. наук Н. А. САЗОНОВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства

Потребление электроэнергии в сельском хозяйстве СССР уже превышает 500 млн. kWh в год, что примерно в 400 раз выше потребления электроэнергии сельским хозяйством до Октябрьской революции. Предполагается, что к концу первой послевоенной пятилетки, в 1950 г., потребление электроэнергии в сельском хозяйстве достигнет 4 млрд. kWh. Когда наше сельское хозяйство станет хозяйством широко электрифицированным, достигнув примерно современного уровня электрификации промышленности, общее потребление электроэнергии в сельском хозяйстве будет составлять не менее 25 млрд. kWh в год. Следует заметить, что это значительно превышает современную выработку энергии в сельском хозяйстве живым тяглом, тракторами, автомашинами, комбайнами, стационарными механическими двигателями и электрическими установками, вместе взятыми.

Структура потребления электроэнергии. Электрическая энергия расходуется в сельском хозяйстве на две основные цели: на электрическое освещение производственных и бытовых помещений и на электрический привод рабочих машин.

По мере развития электрификации производственных процессов удельный вес осветительной нагрузки снижается за счет возрастания моторной нагрузки. В 1926 г. на долю осветительной нагрузки приходилось 92% всей потребляемой энергии, а в 1947 г. удельный вес осветительной нагрузки снизился до 50%; в отдельных районах СССР доля освещения еще ниже. Выборочное обследование двадцати электрифицированных колхозов (Центральный район, Грузия, Узбекистан, Урал, Сибирь), произведенное в 1945 г., показало, что в колхозах с относительно широко осуществленной электрификацией 70% всей потребляемой энергии приходится на силовую нагрузку и только 30% на освещение.

Рассмотрена структура потребления электроэнергии в сельском хозяйстве СССР. Отмечено специальное значение электрического освещения для отдельных областей сельскохозяйственного производства. Исследовано развитие электропривода стационарных и мобильных сельскохозяйственных машин. Указаны особенности применения электроэнергии в социалистическом сельском хозяйстве в сравнении с капиталистической системой. Приведены основные исходные нормативы установленной мощности источников и потребления электроэнергии колхозами.

Из всей электроэнергии, расходуемой в сельском хозяйстве на освещение, примерно 30% приходится на освещение культурных, общественных и производственных помещений.

Электрическое освещение в сельском хозяйстве играет не только большую культурную роль, но является также крупным экономическим фактором, влияющим на развитие ряда отраслей сельскохозяйственного производства.

Роль электрического освещения в производстве. Применение электрического освещения в сельском хозяйстве для производственных целей дает значительный экономический эффект.

Электрическое освещение полевого молотильного тока позволяет вести молотьбу хлеба круглые сутки, благодаря чему сокращаются сроки обмолота и почти вдвое повышается суточная производительность молотильного агрегата. Освещение осуществляется обычно прожекторами заливающего света и лампами с арматурой «глубокоизлучатель». В степных районах нашей страны все более широко применяют электрическое освещение на полевых работах ночью: комбайновая уборка, пахота, боронование и т. п. Передовики сельского хозяйства — трактористы и комбайнеры — благодаря применению на ночной работе электрического освещения добиваются рекордных выработок на один трактор и комбайн.

Чтобы добиться равномерной освещенности рабочей площади и создать хорошую видимость для водителя трактора и комбайна, были разработаны новые оригинальные типы осветительной арматуры.

До последнего времени тракторы, выпускаемые нашими заводами, снабжались генераторами для освещения мощностью 65 W типа ГБТ-4541. Эта мощность была достаточной при транспортных переездах трактора в ночное время, но для освещения полевых работ эта мощ-

ность недостаточна. На тракторах должны быть установлены более мощные осветительные генераторы. Комбайновый агрегат для ночной работы требует установки до 10 светоточек. Благодаря электрическому освещению суточная производительность комбайна увеличивается на 25—30%. Сокращение же сроков уборки в свою очередь снижает потери зерна из-за самоосыпания.

В зимнее время и ранней весной мощные электрические лампы в теплицах восполняют недостаток естественного освещения и тем самым разрешают проблему круглогодичного выращивания свежих овощей и ранней рассады. Электрические лампы могут одновременно служить и источниками тепла. Расход электроэнергии за сезон на одно растение в теплицах доходит до 1—1,5 kWh. О хозяйственной выгоде применения для указанной цели электроосвещения говорит хотя бы тот факт, что в настоящее время во всех хорошо поставленных тепличных хозяйствах (в частности, во всех тепличных хозяйствах под Москвой) дополнительное электроосвещение прочно вошло в практику ведения хозяйства.

Применение электрического освещения вместе с подогревом и вентиляцией воздуха в птичниках в зимнее время создает для птиц благоприятные условия, способствующие повышению яйценоскости. Электрический свет в птичниках включается и выключается постепенно в течение 10—15 мин с помощью автомата, вечером с наступлением сумерек и утром до рассвета. Освещенность на полу птичника рекомендуется в 15 Lx, что требует установки электроламп из расчета 3—4 W на 1 м² пола. Расход для этой цели электроэнергии составляет до 1,5 kWh на одну курицу в год. Яйценоскость в осенне-зимний период благодаря этому увеличивается на 20%.

Электрические лампы оказались одним из эффективных способов борьбы с летающими вредными насекомыми в садах и огородах. Ночью летающие вредители привлекаются ярким светом лампы и улавливаются в противнях с водой или засасываются вентилятором и уничтожаются. Для этой цели рекомендуются лампы мощностью в 200 W, причем один аппарат достаточен для защиты огорода или сада площадью до 5 га. Практика применения таких светоловушек в электрифицированных хозяйствах полностью себя оправдала. Одна светоловушка уничтожает за ночь до 1 kg насекомых.

Электрические лампы ультрафиолетового света предохраняют молодняк животных и птиц от заболевания рахитом и разрешают, таким образом, проблему круглогодичного выращивания поросят и цыплят.

Электрическое освещение в помещениях, где производится яровизация семян, благоприятствует этому процессу и тем самым способствует повышению урожайности.

Этот, далеко не полный, обзор уже существующих методов использования электрического освещения говорит о большом производственном

значении электрического освещения для сельского хозяйства.

Развитие электропривода сельскохозяйственных машин. Электрификация стационарных сельскохозяйственных машин начала осуществляться с первых шагов электрификации сельского хозяйства.

Первое место среди силовых потребителей электроэнергии в сельском хозяйстве заняли ремонтные мастерские в МТС, совхозах и колхозах, а также и колхозные подсобные предприятия (мельницы, лесопилки и пр.). На их долю приходится до 60% всей электроэнергии, расходуемой в настоящее время на моторную нагрузку.

За последние годы трехфазные короткозамкнутые электродвигатели все больше внедряются и в полеводстве и в животноводстве; это весьма характерно для энергетики социалистического сельского хозяйства.

В полеводстве получает широкое распространение электропривод молотилок, оросительных установок, зерноочистительных машин, сортировок, сушилок; в животноводстве — электропривод кормоприготовительных и молочных машин, установок по водоснабжению, доению коров, стрижке овец, чистке животных, вентиляции помещений для скота и т. п. В 1932 г. на эти цели в полеводстве и животноводстве расходовалось примерно 11 млн. kWh, а в 1940 г. потребление электроэнергии на эти цели возросло уже до 100 млн. kWh. В США структура электропотребления в сельском хозяйстве резко отличается от нашей: там от 70 до 90% электроэнергии, потребляемой в сельском хозяйстве, занимает бытовая нагрузка (освещение и бытовые приборы) и совсем незначительная часть электроэнергии, главным образом на крупных фермах, идет на производственные нужды, что целиком определяется условиями капиталистического хозяйства, частного землевладения и хронического аграрного кризиса.

В нашем сельском хозяйстве работает не менее 30 тыс. электродвигателей общей мощностью в 250 тыс. kW. Если принять, что среднегодовое число часов использования электродвигателей в сельском хозяйстве сейчас равно 600, то упомянутые электрические двигатели дают сельскому хозяйству примерно 200 млн. л. с. ч. механической энергии в год. В текущей пятилетке намечено увеличить общее число электродвигателей в сельском хозяйстве до 300 тыс. шт.

Наряду с дальнейшим развитием электрификации стационарных сельскохозяйственных машин в настоящее время становится вполне реальным вопрос о переводе на электрический привод и мобильных сельскохозяйственных машин — тракторов и комбайнов. В СССР создана оригинальная конструкция электрического трактора с кабельным способом питания. Конечно, электрический трактор не может полностью заменить тепловой трактор, который надолго еще останется ведущим энергетическим двигателем в полеводстве, но это не снимает задачи всемерного

распространения электротракторов и самоходных электрокомбайнов, электрическая часть которых работает на том же принципе, что и в электротракторах.

Новые виды применения электричества в сельском хозяйстве. С увеличением источников электроэнергии и удешевлением отпускной стоимости энергии будет получать широкое распространение в сельском хозяйстве новый вид электрической нагрузки — электронагревательные установки, питаемые трехфазным током напряжением 380 В. Подобного рода установки уже получили некоторое распространение в нашем сельском хозяйстве. В животноводстве с успехом применяются электрозапарные котлы, водоподогреватели, пастеризаторы молока и другие установки. Электрический обогрев теплиц и парников оказался настолько эффективным в хозяйственном отношении, что в Запорожской области, например, уже перед войной в колхозах находилось в эксплуатации до 20 тыс. м² электрифицированных теплиц и парников.

Для электрического обогрева типовой теплицы требуется мощность 450—500 Вт на 1 м² полезной площади. Годовой расход электроэнергии при среднем урожае в 25 кг овощей с 1 м² составляет на 1 кг продукции примерно 15 кВт·ч.

В электропарниках нагревательные элементы в виде спиралей стальной проволоки укладываются в почву в специальных керамиковых трубах. Потребная мощность составляет 120—130 Вт на 1 м² полезной площади. Электропарники без ущерба переносят значительные перепады в подаче энергии и могут работать по ограниченно-принудительному графику, не входя в максимум.

Как показал опыт, применение электропарников для выращивания рассады является эффективным при стоимости электроэнергии до 10 коп. за 1 кВт·ч.

Работы советских научно-исследовательских институтов в области применения электричества в сельском хозяйстве открывают новые возможности использования электроэнергии для нужд сельскохозяйственного производства. Мы имеем в виду применение в сельском хозяйстве инфракрасных, ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, применение электрических токов высокой и ультравысокой частоты и пр.

Эффективность применения электроэнергии. Известно, что один киловаттчас электрической энергии, затраченный на освещение, экономит 0,67 кг керосина. 300 млн. кВт·ч, которые расходуются в настоящее время в сельском хозяйстве на электрическое освещение, экономят нашему народному хозяйству примерно 200 тыс. т керосина в год. Каждая тысяча киловаттчасов электрической энергии, затраченная на электропривод рабочих машин, заменяет в среднем 300 чел-дней рабочей силы и 100 коне-дней живого тягла.

10 000 электрифицированных молотильных пунктов, работавших в 1947 г. в Советском Союзе, намолотили не менее 10 млн. т зерна и при этом сэкономили керосина более 50 тыс. т, вы-

свободили для других сельскохозяйственных работ 10 000 тракторов, не менее 15—20 тыс. лошадей, 80 тыс. рабочих. В результате лучшего обмолота потери зерна были значительно сокращены.

Анализ экономики электрифицированных колхозов показывает большие сдвиги в их экономике: общественное хозяйство расширено, увеличены общественные средства производства, повышена урожайность сельскохозяйственных культур и продуктивность животноводства, улучшено использование труда и повышена его производительность, возникли новые подсобные предприятия, заметно окрепло финансовое положение.

Последовательность в развитии электрификации. Исходя из практики сельской электрификации, можно говорить о трех возможных ступенях в развитии применения электричества в сельском хозяйстве.

Первая ступень (простейшая электрификация) заключается в осуществлении электрического освещения всех производственных и бытовых помещений, в частичном применении бытовых нагревательных приборов и в применении 3—4 электродвигателей малой мощности (до 2 кВт) на колхоз.

Указанные электродвигатели могут обслуживать следующие производственные процессы: водоснабжение фермы, зерноочистку, резку соломы, мойку и резку корнеплодов, электропривод в кузнице и мастерской, первичную переработку молока. В качестве нормативов для этой ступени электрификации можно принять для одного колхоза средней мощности (100 дворов): установленную мощность источника в 10 кВт и годовое потребление электроэнергии в 15 000 кВт·ч. При этом структура электропотребления будет примерно следующей: освещение жилых помещений — 50%, бытовые нагревательные приборы — 10%, освещение производственных и общественных помещений — 20%, электродвигатели — 20%.

В обследованных в 1945 г. электрифицированных колхозах, которые стояли на первой ступени электрификации или немного выше, годовое потребление электроэнергии составляло в среднем от 100 до 300 кВт·ч в расчете на 1 двор.

Вторая ступень характеризуется широкой электрификацией сельского хозяйства. На этой ступени осуществляется электрическое освещение всех производственных и бытовых помещений и перевод на электрический привод всех основных стационарных рабочих машин. Одновременно с этим широко применяются электронагревательные аппараты для производственных целей (подогрев воды и кормозапарка) и для бытовых целей (чайники, плитки, утюги).

К числу основных стационарных машин, переводимых на электропривод, относятся: молотилки, зерноочистительные машины, насосы для орошения и водоснабжения, силосорезки, дробилки универсальные, соломорезки, корнерезки, корнемойки, доильные машины, сепараторы, маслоизготовители, вентиляторы, лесопилки,

мельницы, станки по металлу и дереву и т. д. Для обслуживания названных машин требуется на 1 колхоз от 15 до 20 электродвигателей мощностью от 0,5 до 13 kW. Некоторые из электродвигателей должны быть переносными и обслуживать поочередно несколько рабочих машин. В качестве нормативов для этой ступени электрификации можно принять на один колхоз (100 дворов): установленную мощность источника в 50 kW и годовое потребление электроэнергии в 100 000 kWh. Структура электропотребления при этом изменится в сторону повышения удельного веса производственной нагрузки и будет иметь примерно следующий характер: освещение жилых помещений — 10%, бытовые нагревательные приборы — 15%, освещение производственных и общественных помещений — 15%, электродвигатели — 40%, электронагревательные аппараты производственного назначения — 20%. К этому уровню электрификации сейчас уже подошли многие колхозы. В обследованных в 1945 г. электрифицированных колхозах с развитой моторной нагрузкой годовое потребление электроэнергии в среднем на 1 колхозный двор составляло от 650 до 1 000 kWh.

Следует здесь заметить, что при широкой электрификации характер производственных потребителей не допускает длительных перерывов в подаче энергии и значительных колебаний частоты и напряжения и поэтому к источникам электроэнергии в этом случае предъявляются уже более повышенные требования как в отношении бесперебойности в работе, так и в отношении качества отпускаемой электроэнергии.

Указанная выше нормативная мощность источника энергии является минимальной также и с точки зрения возможности запуска короткозамкнутых электродвигателей мощностью порядка 10—15 kW, применяемых в колхозах для привода сложных молотилок, насосов, оросительных установок, крупных мельниц и лесопилок.

Третья ступень характеризуется полной электрификацией сельского хозяйства и заключается в переводе на электропривод не только стационарных, но также и части мобильных

полевых машин (по обработке почвы и уборке урожая), и в широком применении электронегревательных установок (бытовые приборы, водонагреватели, кормозапарники, устройства для обогрева почвы в теплицах и парниках, сушка сельскохозяйственных продуктов и пр.).

Электропахота и самоходные электрокомбайны потребуют применения электродвигателей мощностью в 40—50 kW. В качестве исходных нормативов для этой ступени электрификации можно принять на один колхоз (в 100 дворов): установленную мощность источника в 150 kW и годовое потребление электроэнергии в 250 000 kWh. При этом структура электропотребления, надо полагать, будет (примерно) такова: освещение жилых помещений — 4%, бытовые нагревательные приборы — 12%, освещение производственных и общественных помещений — 8%, электродвигатели — 40%, электронагревательные аппараты производственного назначения — 36%.

В заключение следует подчеркнуть, что в настоящее время, когда в области строительства сельских электростанций достигнут заметный перелом, в результате которого на территории Советского Союза уже имеется сеть из многих тысяч электрических станций и подстанций сельскохозяйственного назначения, главнейшей задачей является правильное и полное использование этих источников электроэнергии путем комплексного внедрения ее непосредственно в производственные процессы сельского хозяйства.

Литература

1. Г. К. Суслопаров. Состояние и перспективы развития сельской электрификации СССР. *Электричество*, № 2, 1948.
2. Н. А. Сазонов. Принцип канатной тяги и электропахота. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, № 12, 1938.
3. П. И. Листов. Некоторые вопросы теории электротракторов. *Электричество*, № 7, 1946.
4. М. Г. Евреинов. Применение электрической энергии в сельском хозяйстве. *Сельхозгиз*, 1938.
5. Н. С. Власов. Влияние электрификации на развитие общественного производства колхозов. *Социалистическое сельское хозяйство*, № 10, 1947.



Самовозбуждающаяся электромагнитная асинхронная муфта

Кандидат техн. наук Е. К. МЕЗИН

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Электромагнитные асинхронные муфты, находящие применение на дизельных судах, имеют возбуждение от постороннего источника постоянного тока.

Однако, необходимость иметь специальный источник постоянного тока может быть обойдена превращением электромагнитной муфты в самовозбуждающуюся. Для этой цели переменный ток (в общем случае многофазный), возникающий в обмотке якоря, выпрямляется и направляется для возбуждения муфты. Выпрямители удобнее всего применить сухие, включенные по многофазной мостовой схеме.

Самовозбуждающаяся асинхронная муфта является новым типом электрической машины и по сравнению с асинхронной муфтой с независимым возбуждением обладает рядом новых свойств.

Принцип работы. Основным условием самовозбуждения асинхронной муфты является наличие остаточного магнетизма в полюсной системе 1 муфты (рис. 1 и 2). При вращении ведущей части муфты остаточное поле полюсов наводит э. д. с. в неподвижном якоре 2 муфты. Многофазный ток, созданный этой э. д. с., полностью (рис. 1) или частично (рис. 2) выпрямляется выпрямителями 3 и направляется в обмотку возбуждения, вследствие чего магнитный поток муфты усиливается. С возрастанием магнитного потока увеличивается э. д. с., увеличивается ток и т. д. При этом вращающий момент муфты непрерывно возрастает. При равенстве

вращающего момента и тормозного якорь муфты придет во вращение.

Скольжение. Скольжение самовозбуждающейся асинхронной муфты $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ может быть определено через ее параметры.

Обозначим отношение приведенного к якору тока возбуждения I_1' к току якоря I_2

$$k = \frac{I_1'}{I_2} \quad (1)$$

и назовем его коэффициентом пропорциональности токов. В дальнейшем будем предполагать, что этот коэффициент не зависит от нагрузки муфты.

Вводя в выражение для тока якоря

$$I_2 = I_1' \frac{x_0 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_0 + x_2)^2 s^2}}$$

коэффициент пропорциональности токов, получим:

$$s_c = \frac{r_2}{\sqrt{k^2 \lambda^2 - (x_0 - x_2)^2}} \quad (2)$$

Выражением (2) определяется основное свойство самовозбуждающейся муфты: работа ее с постоянным скольжением независимо от величины тормозного момента.

Это заключение может быть объяснено на основании следующих рассуждений. При тормозном моменте M_1 якорь муфты имеет скольжение s_1 (кривая 1, рис. 3). С возрастанием

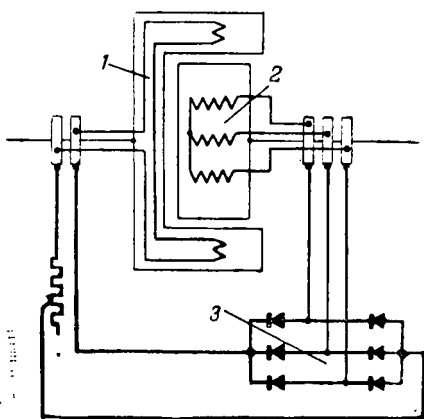


Рис. 1.

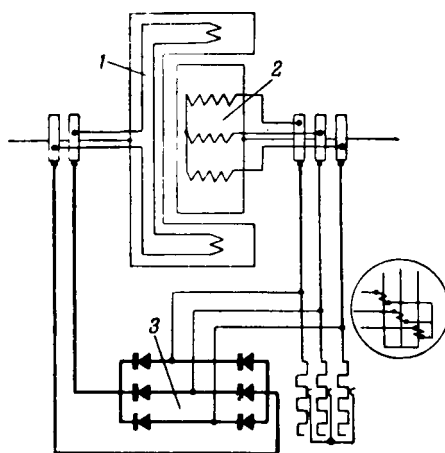


Рис. 2.

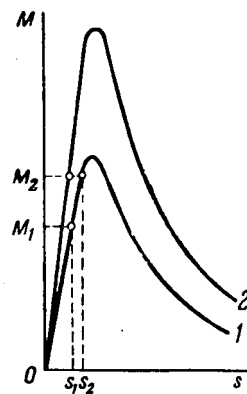


Рис. 3.

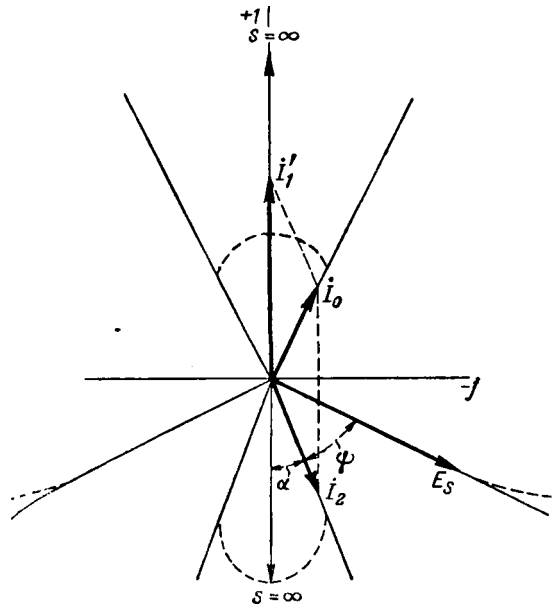


Рис. 4.

тормозного момента до величины M_2 скольжение муфты при неизменном токе возбуждения увеличилось бы до s_2 . Однако, ток возбуждения при этом возрастает. Вследствие квадратичной зависимости вращающего момента от тока возбуждения (без учета насыщения) муфта будет иметь другую кривую вращающего момента (кривая 2, рис. 3). Скольжение при тормозном моменте M_2 будет вновь равно s_1 .

Скольжение, при котором работает муфта, может устанавливаться общим активным сопротивлением якоря r_2 .

Диаграмма токов и э. д. с. Расположение векторов в векторной диаграмме асинхронной муфты определяется углами α и ψ [Л. 1.], которые могут быть определены из выражений

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{r_2}{(x_0 + x_2)s} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{x_2}{r_2} s.$$

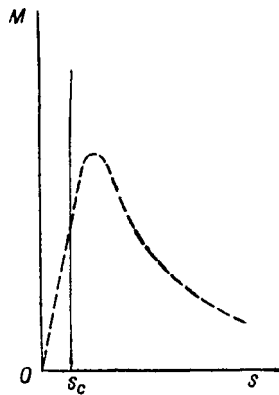


Рис. 5.

Последние выражения позволяют сделать вывод: диаграмма токов самовозбуждающейся асинхронной муфты при условии прямолинейной характеристики намагничивания вырождается из окружности, имеющей место для асинхронной муфты с независимым возбуждением, в прямую. На рис. 4 представлено геометрическое место токов и э. д. с. для ненасыщенной муфты.

Пунктиром показана диаграмма токов и э. д. с. при учете магнитного насыщения муфты (методы учета магнитного насыщения автор предполагает дать в следующей статье).

Вращающий момент. Уравнение для вращающего момента самовозбуждающейся асинхронной муфты может быть получено подстановкой выражения (2) в уравнение вращающего момента асинхронной муфты с независимым возбуждением

$$M = \frac{m_2}{k^2 \omega_1} I_1^2 \sqrt{k^2 x_0^2 - (x_0 + x_2)^2}. \quad (5)$$

На рис. 5 показана зависимость $M = f(s)$ для самовозбуждающейся муфты и для сравнения для муфты с независимым возбуждением (пунктирная кривая). Введением сопротивления в цепь якоря муфты прямая вращающего момента сдвигается в сторону больших скольжений.

Литература

1. Е. К. Мезин. Круговые диаграммы электромагнитной асинхронной муфты. Электричество, № 4, 1947.



Условия выполнения двухслойной обмотки с неравновитковыми секциями

Инж. В. В. ЗИВЕРТ

Электромеханический завод им. Карла Маркса

Двухслойные обмотки имеют широкое распространение в машинах переменного тока. При таких обмотках секции, изготовленные заранее на шаблоне, укладываются в пазы так, что одна сторона каждой секции лежит в нижнем ряду одного паза, а вторая — в верхнем ряду какого-либо другого паза. В этих же пазах соответственно в верхнем и нижнем рядах лежат сторо-

ны других секций. Ширина всех секций делается одинаковой и определяется шагом по пазам.

Если все секции выполнены с одним и тем же числом витков, то во всех пазах получим одинаковое число эффективных проводников. Однако, на практике приходится встречаться с необходимостью выполнять секции с неодинаковым числом витков, чтобы полное число эффективных

витков в каждой фазе было бы требуемым. В этом случае одна половина всего набора (т. е. комплект секций, необходимый для намотки одной машины; число секций в наборе равно числу пазов в машине) имеет секции с одним и тем же числом витков, а секции второй половины — на один эффективный виток больше (или меньше), чем секции первой половины набора.

Рационально укладку секций с неодинаковым числом витков выполнять так, чтобы во всех пазах было одно и то же число эффективных проводников. При этом, очевидно, число их по высье во всех пазах будет нечетное.

При расчете такой обмотки для возможности укладки секций в пазах и получения симметричных параллельных ветвей должен быть соблюден ряд правил: шаг обмотки по пазам должен быть выбран так, чтобы различные секции располагались по всей окружности, равномерно чередуясь, а в каждом пазу лежала бы одна сторона секций с большим числом витков, а другая с меньшим числом витков; соединение групп должно быть выполнено так, чтобы все параллельные ветви получались с одним и тем же числом витков, а э. д. с. всех параллельных ветвей одной какой-либо фазы были бы равны по величине и совпадали бы по фазе.

Условия для возможности укладки секций с неравным числом витков. Выполняя двухслойную обмотку с неравно-витковыми секциями, можно производить укладку их различным образом. Применяются два способа укладки.

При первом способе секции с большим и меньшим числом эффективных витков чередуются. Такая укладка секций показана схематически на рис. 1. Здесь крестиками показаны стороны секций с большим числом витков, а точками — с меньшим числом витков. Видно, что в нижнем ряду во всех пазах с четным номером лежат стороны секций с большим числом витков, а в пазах с нечетным номером лежат стороны секций с меньшим числом витков. В верхнем ряду стороны с большим числом витков лежат в пазах с нечетным номером. Следовательно, при такой укладке секций шаг их по пазам должен быть нечетным (например, 1—8 или 1—10).

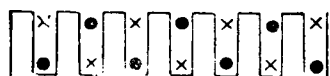


Рис. 1.



Рис. 2.

При втором способе секции чередуются через два паза. Такая укладка показана схематически при тех же условных обозначениях на рис. 2. Можно себе представить нижний ряд как бы смещенным относительно верхнего ряда на два паза. Следовательно, при этой укладке шаг должен быть четным (например, 1—7 или 1—11).

Полное число секций S машины при двухслойной обмотке равно числу пазов Z , следовательно,

$$S = Z = 2^p q m, \quad (1)$$

где p — число пар полюсов;

q — число пазов на полюс и фазу;

m — число фаз.

При нечетном шаге (укладка по рис. 1) число секций должно быть обязательно четным. При четном шаге полное число секций должно быть кратно четырем. Для воз-

можности укладки по рис. 2 необходимо добавить еще одно ограничение — такая укладка невыполнима при четном шаге, кратном четырем.

Следовательно, для $m = 3$ условия для выполнения двухслойной обмотки при неравном числе витков в секциях с такой укладкой, при которой во всех пазах лежит одно и то же число проводников, можно формулировать следующим образом:

1. Четное число пар полюсов и целое число пазов на полюс и фазу — обмотка выполнима как с четным, так и с нечетным шагом.

2. Нечетное число пар полюсов и четное число пазов на полюс и фазу — обмотка выполнима как с четным, так и с нечетным шагом.

3. Нечетное число пар полюсов и нечетное число пазов на полюс и фазу — обмотка выполнима только с нечетным шагом.

4. Дробное число пазов на полюс и фазу и число пар полюсов, кратное четырем, — обмотка выполнима и с четным и нечетным шагом.

5. Дробное число пазов на полюс и фазу и число пар полюсов, не кратное четырем, — обмотка выполнима только с нечетным шагом.

6. Дробное число пазов на полюс и фазу и нечетное число пар полюсов — обмотка невыполнима.

7. Четный шаг, кратный четырем, — обмотка невыполнима.

8. Нечетный шаг — тогда секции с одним и тем же числом витков должны укладываться через паз (чередоваться с секциями другого числа витков).

9. Четный шаг — тогда секции с одним и тем же числом витков чередуются попарно через два паза.

Необходимо оговориться, что указанные правила для дробного числа пазов годны только в том случае, если на пару полюсов и фазу число пазов целое.

Для других чисел пазов, дробных на полюс и фазу, необходимо проверять возможность укладки секций по pq равному целому числу для нечетного шага и четному числу для четного шага.

Условие для образования параллельных ветвей при целом числе пазов на полюс и фазу. В основу дальнейших рассуждений положим требование, чтобы обмотка была симметричной, иначе говоря, все параллельные ветви должны иметь, во-первых, равные и, во-вторых, совпадающие по фазе э. д. с. во всех параллельных ветвях одной и той же фазы (предполагается, как и раньше, что обмотка трехфазная).

Образование параллельных ветвей обычно выполняется так, что секции одной группы (секции одного полюса какой-либо фазы) соединяются все последовательно, а параллельные ветви образуются соответствующим соединением групп.

Будем в дальнейшем называть группами одного и того же рода такие, которые, во-первых, имеют равное число витков, и, во-вторых, секции с равным числом витков располагаются идентично в поле. Следовательно, группы одного и того же рода будут иметь э. д. с., равные и совпадающие по фазе. Полное число групп в каждой фазе будет $2p$. Таким образом, для получения симметричной обмотки необходимо соблюдать следующее соотношение:

$$\frac{2p}{ab} = n, \quad (2)$$

где n — целое число;

a — число параллельных ветвей;

b — число родов групп. Параллельные ветви у каждой фазы образуются независимо от других фаз. Поэтому число секций каждой фазы, деленное на число параллельных ветвей в фазе, должно быть четным.

1. Если все группы идентичны (одного и того же рода), то для получения симметричной обмотки должно соблюдаться условие

$$\frac{2p}{a} = \text{целое число}. \quad (3)$$

Очевидно, это условие применимо, когда q четно, а u — нечетно или q кратно четырем, а u — четно.

2. При нечетных q и y группы будут двух родов. В этом случае необходимо соблюдать соотношение

$$\frac{p}{a} = \text{целое число.} \quad (4)$$

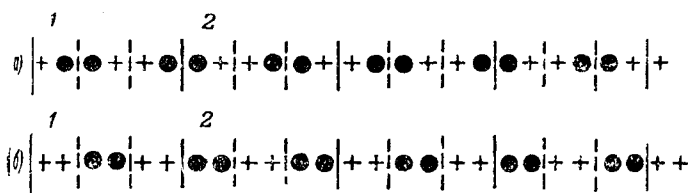


Рис. 3.

3. Если q четно, но не кратно четырем, а y — четно, то группы будут также двух родов. При этом возможно образование групп двумя способами: а) группы первого и второго рода имеют одинаковое число витков, б) группы образованы так, что число витков у них разное. На рис. 3 показано схематически расположение секций для случая а и для случая б ($q=2$).

Сплошными вертикальными линиями отделены полюсные деления, а пунктирными — группы (фазы). Крестиками обозначены секции с большим числом витков, а точками секции с меньшим числом витков. Показан только один верхний ряд. Группы 1-го и 2-го рода обозначены соответственно цифрами 1 и 2.

При образовании групп по рис. 3, а геометрические суммы э. д. с. будут давать векторы, равные по величине, но не совпадающие по фазе, а при составлении групп по б э. д. с. их будут различны по величине, но совпадающими по фазе.

Если параллельные ветви образуются так, что в каждую из них последовательно включается одинаковое число групп обоих родов, то, очевидно, должно быть соблюдено условие (4).

В рассмотренных выше случаях б и в возможно образование параллельных ветвей и иными способами, при которых число параллельных ветвей будет такое, что условие (4) не соблюдается, но все ветви имеют равные и совпадающие по фазе э. д. с.

Пользуясь тем, что $e_1 = e_2 \frac{w_1}{w_2}$, возможно подобрать такие числа x и y для числа групп в параллельных ветвях, чтобы $xe_1 = ye_2$. При этом группы первого рода дадут a_1 параллельных ветвей, а группы второго рода a_2 параллельных ветвей. Общее число параллельных ветвей $a = a_1 + a_2$. Так как э. д. с. всех ветвей равны согласно поставленному условию, то можем их определить из выражения

$$xe_1 = ye_2 = \frac{p(e_1 + e_2)}{a}.$$

Далее, можем написать для числа групп одного и того же рода

$$xa_1 = ya_2 = p;$$

при таком образовании групп необходимо, чтобы p было кратно a_1 и a_2 , а следовательно, x и y .

Между последними четырьмя числами должно существовать соотношение

$$\frac{x}{y} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{w_2}{w_1}.$$

К написанным выражениям необходимо добавить еще одно ограничение:

$$a = a_1 + a_2 < 2p.$$

Возможно также и такое комбинированное соединение, при котором часть группы первого рода (обязательно с большей э. д. с.) образует a_1 параллельных ветвей, а остальные группы первого рода с группами второго рода образуют a_2 параллельных ветвей. При этом должны быть соблюдены следующие соотношения:

$$a = a_1 + a_2,$$

$$xe_1 = ze_1 + ye_2 = \frac{p}{a} (e_1 + e_2);$$

$$ya_2 = xa_1 + za_2 = p;$$

$$\frac{x - z}{y} = \frac{e_2}{e_1};$$

$$\frac{y - z}{x} = \frac{a_1}{a_2};$$

$$v = \frac{p}{a_2};$$

$$x = \frac{p}{a} \frac{e_1 + e_2}{e_1}.$$

Приведенные способы образования параллельных групп для случая дробного $\frac{p}{a}$ из-за сложности выполнения

следует избегать. В случае же необходимости они могут быть выполнены с обязательной проверкой в каждом отдельном случае симметричности включения групп и равенства э. д. с. всех параллельных ветвей.

4. Когда q нечетно, а y четно, то число родов групп будет 4. Этот случай представлен для $q=3$ на рис. 4. Видно, что группы будут двух родов по числу витков и, кроме того, двух родов по расположению секций в магнитном поле. В этом случае должно быть соблюдено соотношение

$$\frac{p}{a} = 2n, \quad (5)$$

где n — целое число.



Рис. 4.

Возможно также большее значение a , если делать комбинированные соединения.

Для получения, по возможности, одинаковых полей у всех полюсов рекомендуется соединение групп в параллельные ветви выполнять так, чтобы группы смежных полюсов принадлежали различным параллельным ветвям. Такое соединение называется *распределенным*.

При последовательном соединении подряд групп нескольких смежных полюсов получим соединение, называемое *сосредоточенным*.

1. Если все группы идентичны (одного рода), то соединение их в параллельные ветви может быть выполнено и сосредоточенное и распределенное.

2. Если шаг нечетный и число пазов на полюс и фазу также нечетное, то, как было указано, группы будут двух родов.

У одной и той же фазы все полюса с четным номером будут иметь группу первого рода, а все полюса с нечетным номером — группу второго рода. При таком расположении групп распределенное соединение невозможно.

Однако, в этом случае возможно соединение групп, которое назовем *парнополюсное распределенное*. Такое соединение получим, например, при числе полюсов $2p=16$ и числа параллельных ветвей $a=2$, если в каждую параллельную ветвь соединим полюса не подряд, а через два, а именно: в одну ветвь включим группы полюсов с номерами 1, 2, 5 и 6, а во вторую ветвь группы с номерами полюсов 3, 4, 7 и 8. Группы 1 и 2 полюсов будут составлять пару, равно как 5 и 6 и т. д., поэтому такой группировке и дано название *парнополюсное*.

3. При четном шаге и четном числе пазов на полюс и фазу, но не кратном четырем, группы будут также двух родов. Чередование групп обоих родов будет идентично вышеизложенному, при расположении секций по рис. 1 или 2. Поэтому соединение групп в параллельные ветви может быть выполнено либо сосредоточенное, либо парно-

полосное, распределенное, а также комбинированное, рассмотренное выше.

4. Если y четно, а q нечетно, то по вышеизложенному группы будут четырех родов. Две смежные группы будут иметь четное число секций, но не делящееся на четыре.

В зависимости от того, какое сочетание производить групп по парам, можем получить обе пары с одинаковым числом секций большего и меньшего числа витков, либо две смежных пары групп будут иметь различное число одинаковых секций. В обоих случаях сочетаний секций в группах будем иметь идентичное повторение групп через каждые четыре группы.

Полоса с группами одного и того же рода в одной и той же фазе будут регулярно чередоваться. Следовательно, в этом случае возможно образование параллельных групп либо с сосредоточенным соединением, либо четырехполосно-распределенное. Например, при $2p = 16$ и $a = 2$ в одну параллельную ветвь включим последовательно группы полюсов 1; 2; 3; 4; 9; 10; 11 и 12, а во вторую 5; 6; 7; 8; 13; 14; 15 и 16.

Из рис. 4 можно видеть, что возможно такое число параллельных ветвей, чтобы соблюдалось условие (4), а не (5), при этом соединение в параллельные ветви будет распределенное. Так, на рис. 4 группа первого рода, соединенная последовательно с группой третьего рода, дает то же число витков, что и группы второго и четвертого рода, также соединенные последовательно. Следовательно, э. д. с. обеих ветвей будут равны. Фазы э. д. с. будут также одинаковы, что легко проверить сложением векторов.

Из изложенного в настоящем разделе можем вывести следующие правила для образования параллельных ветвей при целом числе пазов на полюс и фазу.

а) Если q четно, а y нечетно, то число полюсов должно нацело делиться на число параллельных ветвей. При этом возможно как сосредоточенное, так и распределенное соединение групп.

б) Если q кратно четырем, а y четно, то число полюсов должно нацело делиться на число параллельных ветвей. При этом возможно и сосредоточенное и распределенное соединение групп.

в) Если q и y четны, но не кратны четырем, то число пар полюсов должно делиться нацело на число параллельных ветвей. Соединение групп может быть либо сосредоточенное, либо парнополосное распределенное. Если это условие не выполнено, то в некоторых случаях возможны, как было показано выше, комбинированные соединения.

г) Если q и y нечетны, то число пар полюсов должно делиться нацело на число параллельных ветвей. Соединение групп возможно либо сосредоточенное, либо парнополосное распределенное.

д) Если q нечетно, а y четно, то число пар полюсов, деленное на число параллельных ветвей должно давать четное число. Соединение групп в параллельные ветви возможно сосредоточенное или четырехполосно-распределенное.

Возможно также распределенное соединение с числом пар параллельных ветвей таким, чтобы число пар полюсов, деленное на число параллельных ветвей, давало целое число.

Условия для образования параллельных ветвей при дробном числе пазов на полюс и фазу. Рассмотрим обмотку с дробным числом пазов на полюс и фазу ограничим случаем двигателей, когда $2q$ целое, т. е. для практически встречающихся случаев $q = 1\frac{1}{2}$; $2\frac{1}{2}$; $3\frac{1}{2}$ и $4\frac{1}{2}$. В этом случае возможно выполнение обмотки также с четным или нечетным шагом.

а) Если y нечетно, то четыре смежных группы дадут группы четырех родов. Далее группы этих четырех родов будут повторяться в том же порядке.

Таким образом, для образования симметричных параллельных ветвей при q дробном с половинкой и нечетном шаге необходимо соблюдать условие (5).

Общие условия выполнения двухслойной обмотки с неравновитковыми секциями

Шаг по пазам y	Нечетный			Четный				
Возможные способы ¹ укладки	По рис. 1			По рис. 2				
Условие для выполнения укладки	pq — целое			pq — четное Шаг y не должен делиться на 4				
Возможные ¹ значения q	Четное $q = 2k$	Нечетное $q = 2k + 1$	Дробное $q = k + \frac{1}{2}$	Кратное четырем $q = 4k$	Четное $q = 4k + 2$	Нечетное $q = 4k + 1$	Дробное $q = k + \frac{1}{2}$	
Возможные значения p	Любое	Любое	Четное	Любое	Любое	Четное	Кратное 4	
Условия ¹ для образования параллельных ветвей ²	$\frac{2p}{ab} = n$			$\frac{2p}{ab} = n$				
Число родов групп b	1	2	4	1	2	4	8	
Возможное ² значение a	$a = \frac{2p}{n}$	$a = \frac{p}{n}$	$a = \frac{p}{2n}$	$a = \frac{2p}{n}$	$a = \frac{p^*}{n}$	$a = \frac{p^*}{2n}$	$a = \frac{p}{n}$	$a = \frac{p}{4n}$
Соединение параллельных ветвей	Сосредоточенное и распределенное	Сосредоточенное и парнополосное распределенное	Сосредоточенное и четырехполосное распределенное	Сосредоточенное и распределенное	Сосредоточенное и парнополосное распределенное	Сосредоточенное и четырехполосное распределенное	Распределенное	Сосредоточенное и восьмиполосное распределенное

¹ k — целое число.

² n — целое число, при котором a — целое.

* При комбинированном соединении это условие не соблюдается.

Наличие в первом каскаде лампового усилителя (усилителя напряжения) ламп типа 6А6 или 6Н7 с независимыми источниками питания анодов позволило осуществить положительную обратную связь между лампами и благодаря этому достигнуть высокого коэффициента усиления. Изменение наклона характеристики $U_{вых} = f(U_{вх})$ первого каскада осуществляется изменением степени связи между лампами. Наибольшая чувствительность получится при астатической настройке, когда

$$\Delta R_1 \cdot \Delta R_2 \cdot S_1 \cdot S_2 = 1,$$

где ΔR_1 и ΔR_2 — участки сопротивлений R_1 и R_2 , на которые включены сетка — катод ламп;

S_1 и S_2 — динамическая крутизна ламп. Выходное напряжение U_v усилителя напряжения равно разности падений напряжения на анодных сопротивлениях R_1 и R_2 . Это напряжение управляет зажиганием тиратрона T . Для обеспечения соответствия между полярностью напряжения на выходе и на входе второго каскада усилителя к тиратрону T присоединен газотрон G . Дополнительное сопротивление r_f в цепи анода газотрона подобрано так, чтобы среднее значение выходного тока было равно нулю, если угол зажигания тиратрона равен $\frac{\pi}{2}$.

Для возможности получения статической зависимости между входным и выходным напряжением всего усилителя при астатической настройке первого каскада в устройстве предусмотрен трансформатор ТД, э. д. с. вторичной обмотки которого сдвинута по фазе по отношению к анодному напряжению первого каскада на $50-70^\circ$ (посредством сопротивления r_φ) и подано на одну из сеток двояного триода Л.

Принцип действия РПЛ, при наличии трансформатора ТД, пояснен диаграммами напряжений на рис. 2. Момент «прокидывания» напряжения будет зависеть не только от знака, но и от величины напряжения, подаваемого на вход усилителя. Изменяя амплитуду напряжения во вторичной обмотке трансформатора ТД, можно изменять коэффициент усиления РПЛ в больших пределах. Переменная составляющая выходного тока РПЛ используется в схеме для уменьшения гистерезиса в подвозбудителе P .

Следует отметить, что ламповый усилитель РПЛ можно рассматривать как аналог механизма вибрационного регулятора (Тиррилла). Известно, что продолжительность времени закрытия или открытия контактов последнего зависит от величины отклонения регулируемой величины, точно так же, как степень закрытия или открытия тиратрона T в схеме РПЛ зависит от величины выходного напряжения. Однако РПЛ имеет несомненные преимущества перед электро-механическим вибрационным регулятором: отсутствие быстро изнашивающихся контактов, безинерционность, высокая чувствительность, от-

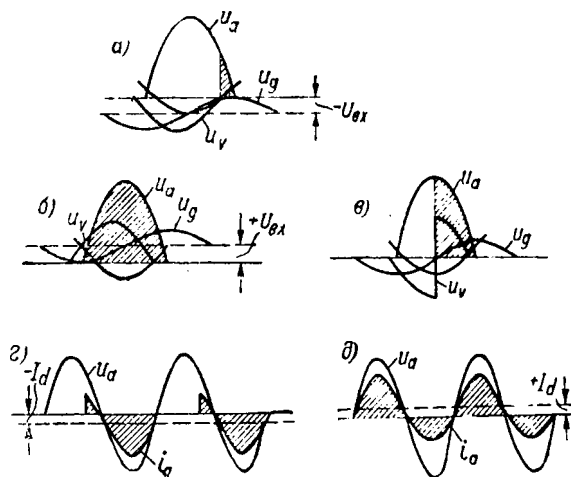


Рис. 2. Диаграммы напряжений и токов, поясняющие принцип действия усилителя РПЛ.

a — отрицательное напряжение на входе РПЛ; b — положительные напряжения на входе РПЛ; $в$ — напряжение на входе РПЛ равно нулю; $г$ — тиратрон закрыт; $д$ — тиратрон открыт.
 u_a — анодное напряжение тиратрона; i_a — выходной ток РПЛ;
 I_d — среднее значение выходного тока; u_{ox} — напряжение на выходе РПЛ; u_g — напряжение на сетке лампы Л; u_v — напряжение на выходе первого каскада РПЛ.

сутствие мертвой зоны. Кроме того, первый каскад РПЛ обладает преимуществами также и перед известными ламповыми усилителями напряжения: а) высокий коэффициент усиления при наличии всего лишь одной лампы; б) возможность астатической настройки; в) почти полное отсутствие явлений «дрейфа» без применения тех или иных средств стабилизации усилителя.

В качестве электромеханического усилителя электромашинного типа P применен обычный электрический генератор постоянного тока, так как использование амплидина не исключает необходимости предварительного лампового усиления для получения высокой точности регулирования.

Последовательное включение промежуточного усилителя P в цепь шунтовой обмотки возбудителя B эквивалентно наличию у возбудителя двух обмоток: самовозбуждения и независимого возбуждения (регулирующей).

Возбудитель B работает на прямолинейной части динамической характеристики при сопротивлении цепи шунтовой обмотки возбудителя, равного критическому. Такой режим работы возбудителя B (подобный режиму работы ротора) придает регулируемой системе астатическую (изодромную) характеристику: после окончания процесса регулирования регулятор «возвращается к нулю». Поэтому постоянная составляющая э. д. с. на якоре подвозбудителя P после окончания процесса регулирования становится равной нулю.

Основное преимущество выбранного режима работы возбудителя B заключается в том, что при этом оказывается возможным осуществить плавное изменение номинального напряжения генератора в широких пределах, посредством перемещения движка ПУ или ПР, без необходи-

кости дополнительно воздействовать на возбуждение генератора, для возвращения регулятора в среднее (нулевое) положение. Это свойство значительно упрощает схему управления регулируемым объектом.

Мост Уитстона в цепи обмотки возбуждения возбuditеля B предусмотрен для компенсации погрешности регулирования.

Положение движка на сопротивлении R в диаграмме моста выбирается так, чтобы эквивалентное сопротивление цепи самовозбуждения подвозбудителя P было бы равно критическому.

В связи с наличием цепей «критического самовозбуждения» не только у подвозбудителя P , но и возбuditеля B регулируемая система содержит как бы два астатических элемента. Известно, что устойчивая работа такой системы возможна лишь при надлежащем выборе противокосильных средств. Если не требуется высокая точность регулирования, то, изменив полярность выходных зажимов моста Уитстона, можно использовать последний в качестве отрицательной обратной связи, обеспечивающей устойчивость регулирования без применения других средств. В случае же использования моста в качестве корректирующей (положительной) связи в схеме должен быть предусмотрен стабилизирующий трансформатор ТОС. Кроме того, для уменьшения влияния положительной обратной связи на устойчивость в переходном режиме последовательно с якорем подвозбудителя P включена обмотка возбуждения возбuditеля в общем плече моста. Поэтому э. д. с. якоря подвозбудителя P частично компенсируется э. д. с. самоиндукции, возникаю-

щей в обмотке возбуждения возбuditеля при переходном режиме.

Первичная обмотка трансформатора обратной связи ТОС включена на якорь возбuditеля B , а вторичная — последовательно в цепь сетки на вход РПЛ. Сопротивление rr в цепи вторичной обмотки трансформатора выбирается, как правило, весьма большим. Уменьшение сопротивления rr приводит к снижению чувствительности трансформаторной обратной связи.

Почти все элементы описанной регулируемой системы представляют собой стандартные изделия электропромышленности и выбор их не может вызвать особых затруднений. Исключение составляют трансформатор обратной связи и мост в цепи возбуждения возбuditеля.

Следует отметить, что этот регулятор характеризуется простотой схемы, малым габаритом, легкостью изготовления и простотой настройки. По сравнению с аналогичными по принципу действия электромеханическими регуляторами (Тирилля) описываемый регулятор обладает более высокой точностью ($\pm 0,2\%$) и быстротой действия. Повышение точности и быстродействия регулирования у регулятора не сопровождается резким снижением устойчивости. По своему назначению регулятор может являться при надлежащем изменении схемы включения регулятором скорости, напряжения, мощности, тягового усилия, тока и т. п. Кроме того, регулятор может найти применение для управления реверсивным регулируемым электроприводом.

Экспериментальная проверка, произведенная в лабораторных условиях и опыт внедрения в промышленность подтвердили высокие качества описанного регулятора.



Оптимальный режим загрузки ртутно-выпрямительных агрегатов тяговых подстанций

Кандидат техн. наук С. Н. ЛЯНДРЕС

Московский энергетический институт им. Молотова

Нагрузка тяговых подстанций складывается из тяговых нагрузок отдельных поездов. Следуя за изменением нагрузки поездов, непрерывно изменяется и нагрузка тяговой подстанции. На трамвае, метрополитене и пригородных железных дорогах резко увеличиваются размеры движения в часы утреннего и вечернего максимумов. Характер изменения нагрузки тяговой подстанции за сутки приведен на рис. 1. Для обеспечения бесперебойного электроснабжения поездов приходится в разное время суток держать в работе различное число агрегатов. При изменении нагрузки подстанции, а следовательно, и ко-

личества одновременно работающих агрегатов будут изменяться и потери энергии на преобразование — будет меняться к. п. д. подстанции.

Для установления оптимального количества агрегатов и нагрузок, при которых целесообразно подключать дополнительный агрегат, необходимо установить оптимальную нагрузку агрегатов с точки зрения потерь энергии. В ртутно-выпрямительном агрегате происходит потеря энергии в трансформаторе выпрямителя, в самом выпрямителе и потеря на собственные нужды выпрямителя.



Пример графика нагрузки тяговой подстанции.

В общем виде потери энергии в агрегате ΔP_{agr} можно выразить уравнением

$$\Delta P_{agr} = A + B \left(\frac{I_s}{I_{с.н.}} \right) + C \left(\frac{I_s}{I_{с.н.}} \right)^2, \quad (1)$$

где A — часть потерь, независящих от нагрузки;
 B — коэффициент, характеризующий часть потерь, пропорциональных нагрузке;
 C — коэффициент, характеризующий часть потерь, пропорциональных квадрату нагрузки;

I_s — мгновенное значение выпрямленного тока;

$I_{с.н.}$ — номинальная нагрузка агрегата на стороне выпрямленного тока.

Величина средних потерь энергии в агрегате за определенный отрезок времени будет:

$$\begin{aligned} \Delta P_{cp} &= \frac{1}{T} \int_0^T \left[A + B \left(\frac{I_s}{I_{с.н.}} \right) + C \left(\frac{I_s}{I_{с.н.}} \right)^2 \right] dt = \\ &= \frac{1}{T} \left[A \int_0^T dt + \frac{B}{I_{с.н.}} \int_0^T I_s dt + \frac{C}{I_{с.н.}^2} \int_0^T I_s^2 dt \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

Рассмотрим отдельные члены правой части уравнения (2)

$$A \frac{1}{T} \int_0^T dt = A; \quad \frac{B}{I_{с.н.}} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T I_s dt = \frac{B}{I_{с.н.}} \cdot I_{cp};$$

$$\frac{C}{I_{с.н.}^2} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T I_s^2 dt = \frac{C}{I_{с.н.}^2} \cdot I_{с.э}^2.$$

Как известно, эффективный ток может быть выражен через средний, как

$$I_{с.э}^2 = I_{ср}^2 \left(1 + \frac{\beta}{n} \right) = I_{ср}^2 + \frac{I_{ср}^2 \beta}{n}, \quad (3)$$

где β — среднеквадратичное отклонение величины тока одного поезда;

n — число поездов на линии. Так как $I_{ср} = i \cdot n$, где i — мгновенное значение тока одного поезда, то

$$I_{с.э}^2 = I_{ср}^2 + \frac{I_{ср}^2 \beta}{n} = I_{ср}^2 + I_{ср} i \beta. \quad (4)$$

Подставляя полученные значения в уравнение (2), найдем, что

$$\begin{aligned} \Delta P_{cp} &= \frac{1}{T} \int_0^T \left[A + B \left(\frac{I_s}{I_{с.н.}} \right) + C \left(\frac{I_s}{I_{с.н.}} \right)^2 \right] dt = \\ &= A + B \left(\frac{I_s}{I_{с.н.}} \right) + C \frac{I_{с.э}^2 + I_{ср} i \beta}{I_{с.н.}^2} = \\ &= A + \left(B + \frac{C i \beta}{I_{с.н.}} \right) \left(\frac{I_s}{I_{с.н.}} \right) + C \left(\frac{I_s}{I_{с.н.}} \right)^2. \end{aligned}$$

Обозначим $\left(B + \frac{C i \beta}{I_{с.н.}} \right) = B'$ и $\frac{I_s}{I_{с.н.}} = \gamma$ (коэффициент загрузки). Тогда

$$\Delta P_{cp} = A + B' \gamma + C \gamma^2. \quad (5)$$

Если на подстанции работает N агрегатов, то общие потери мощности всех агрегатов, при одной и той же нагрузке подстанций, будут:

$$\begin{aligned} \Delta P_N &= \left(A + \frac{1}{N} \cdot B' \gamma + \frac{C}{N^2} \gamma^2 \right) N = \\ &= AN + B' \gamma + \frac{C \gamma^2}{N}. \end{aligned}$$

Для нахождения оптимального количества агрегатов возьмем производную потерь по количеству агрегатов и приравняем ее нулю:

$$\frac{d(\Delta P_N)}{dN} = \frac{d \left[AN + B' \gamma + \frac{C \gamma^2}{N} \right]}{dN} = A - \frac{C \gamma^2}{N^2} = 0,$$

откуда

$$N_{опт} = \gamma \sqrt{\frac{C}{A}}. \quad (6)$$

или

$$\gamma_{опт} = N \sqrt{\frac{A}{C}} \quad (7)$$

и

$$I_{с.опт} = I_{с.н.} \sqrt{\frac{A}{C}} N^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Для одного агрегата $\gamma_{опт} = \sqrt{\frac{A}{C}}$ или $I_{с.опт} = I_{с.н.} \sqrt{\frac{A}{C}}$.

Из выведенных соотношений оптимальной нагрузки агрегатов видно, что оптимальная загрузка зависит от соотношений коэффициентов A и C уравнения потерь в агрегатах. Коэффициенты B и B' в уравнение оптимального режима не входят.

Таким образом, оптимальная нагрузка агрегатов зависит не от мгновенных колебаний нагрузки, а только от средней нагрузки агрегатов в рассматриваемое время.

Держать постоянно в работе наивыгоднейшее число агрегатов невозможно, так как это число может быть даже дробным. При одной и той же нагрузке на подстанции с увеличением количества параллельно работающих агрегатов увеличиваются постоянные потери. Потери, пропорциональные первой и второй степени нагрузки, при этом уменьшаются. При построении графика работы агрегатов подстанции следует установить оптимальную величину нагрузки, при которой целесообразно к одному или N работающим агрегатам подключить второй или $N+1$ -й агрегат.

Так как при одной и той же нагрузке количество параллельно включенных агрегатов влияет на величину потерь, то для подключения или отключения агрегата надо выбрать такой момент, при котором величина потерь в агрегатах не будет изменяться. Такому моменту соответствует определенная нагрузка, при которой потери для N и $N+1$ работающих агрегатов одинаковы.

При N работающих агрегатах потери

$$\Delta P_N = AN + B'\gamma + C \frac{\gamma^2}{N}. \quad (9)$$

При $N+1$ работающих агрегатах потери

$$\Delta P_{N+1} = A(N+1) + B'\gamma + C \frac{\gamma^2}{N+1}. \quad (10)$$

Разность этих потерь

$$\begin{aligned} K &= \Delta P_{N+1} - \Delta P_N = \\ &= \left[A(N+1) + B'\gamma + C \frac{\gamma^2}{N+1} \right] - \left[AN + B'\gamma + C \frac{\gamma^2}{N} \right] = A - \frac{C\gamma^2}{N(N+1)}. \end{aligned}$$

Если $K < 0$ и $\frac{A}{C} < \frac{\gamma^2}{N(N+1)}$ или $\sqrt{N(N+1)} < N_{opt}$, то следует держать в работе $(N+1)$ агрегатов; если же $K > 0$ и $\frac{A}{C} > \frac{\gamma^2}{N(N+1)}$ или $\sqrt{N(N+1)} > N_{opt}$, то следует держать в работе N агрегатов.

Включать дополнительный агрегат следует тогда, когда $K=0$; $A - \frac{C\gamma^2}{N(N+1)} = 0$:

$$\gamma_{opt} = \sqrt{\frac{A}{C} (N+1)N} = \gamma'_{opt} \cdot \sqrt{N(N+1)}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I_{s, opt} &= I_{s, n} \sqrt{\frac{A}{C} N(N+1)} = \\ &= I'_{s, opt} \sqrt{N(N+1)} \end{aligned} \quad (12)$$

(значок ' при γ_{opt} и $I_{s, opt}$ относится к работе одного агрегата).

Зная нагрузку тяговой подстанции I_s , постоянные коэффициенты A и C , а также номинальную нагрузку каждого выпрямителя, можно найти оптимальное количество агрегатов, которые следует держать одновременно в работе. Для выяснения оптимальной загрузки агрегатов

и момента включения нужно знать постоянные коэффициенты. На основании опытных данных величины потерь мощности в ртутно-выпрямительном агрегате можно найти числовые значения A, B', C при различных нагрузках, для чего мы воспользуемся методом наименьшей разности квадратов. Обозначим через σ^2 — среднее значение квадрата разности потерь, найденных по уравнению (5), и действительных потерь ΔP_∂ в ртутно-выпрямительном агрегате, установленных экспериментально, т. е.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_1^n [(A + B'\gamma + C\gamma^2) - \Delta P_{\partial p}]^2. \quad (13)$$

Для нахождения коэффициентов A, B и C и значения дисперсии возьмем частные производные дисперсии по этим коэффициентам и приравняем их нулю:

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial A} = \frac{2}{n} \sum_1^n [A + B'\gamma + C\gamma^2 - \Delta P_\partial] = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial B'} = \frac{2}{n} \sum_1^n [A + B'\gamma + C\gamma^2 - \Delta P_\partial] \gamma = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial C} = \frac{2}{n} \sum_1^n [A + B'\gamma + C\gamma^2 - \Delta P_\partial] \gamma^2 = 0.$$

Отсюда

$$A \sum_1^n 1 + B' \sum_1^n \gamma + C \sum_1^n \gamma^2 = \sum_1^n \Delta P_\partial; \quad (14)$$

$$A \sum_1^n \gamma + B' \sum_1^n \gamma^2 + C \sum_1^n \gamma^3 = \sum_1^n \Delta P_\partial \gamma; \quad (15)$$

$$A \sum_1^n \gamma^2 + B' \sum_1^n \gamma^3 + C \sum_1^n \gamma^4 = \sum_1^n \Delta P_\partial \gamma^2. \quad (16)$$

Для решения этих уравнений достаточно знать значения коэффициентов загрузки γ и величины действительных потерь мощности в агрегатах для различных нагрузок. При установке на тяговой подстанции однотипных агрегатов для параллельной работы на основании опытных данных о потерях найдены значения постоянных коэффициентов A, B' и C нами подсчитаны оптимальные нагрузки, при которых целесообразно подключить к N работающим агрегатам $N+1$ -й агрегат. Эти данные приведены в таблице.

Оптимальная загрузка ртутно-выпрямительных агрегатов РВ-10 и РВ-20 колеблется в пределах $87 \div 57,8\%$ от номинальной.

Выводы. Таким образом, для соблюдения оптимального к. п. д. подстанции и увеличения срока службы агрегатов тяговой подстанции необходимо:

1. Держать в работе оптимальное число агрегатов $N_{opt} = \sqrt{N(N+1)}$, при нагрузке $I_s = I_{s, opt} \sqrt{N(N+1)}$. Так как оптимальное число агрегатов может быть дробным, то следует: а) при $N_{opt} < \sqrt{N(N+1)}$ держать в работе бли-

Количество агрегатов	$\gamma_{опт. агр.}, \%$	Ток пере-хода, А	Тип выпрямителя и агрегата	Постоянные коэффициенты		
				A	B	C
1	74,5	745	РВ-10 с ТМР-1000/20 при шести-фазном режиме	9,1	3,74	32,7
2	64,5	1290				
3	60,8	1824				
4	59,0	2360				
5	57,8	2860				
1	76,0	760	РВ-10 с ТМР-1000/35 при шести-фазном режиме	9,2	5,14	31,7
2	66,0	1320				
3	62,2	1866				
4	60,25	2410				
5	59,0	2950				
1	80,0	1600	РВ-20 с ТМР-1800/35 при шести-фазном режиме	7,2	61,4	22,4
2	69,25	2770				
3	65,8	3920				
4	63,8	5100				
5	62,0	6200				
1	81,8	818	РВ-10 с ТМР-1000/20 при трех-фазном режиме	9,15	6,14	27,2
2	71,0	1420				
3	67,0	2010				
4	64,9	2596				
5	63,6	3180				
1	87,0	870	РВ-10 с ТМР-1000/35 при трех-фазном режиме	8,77	10,4	23,0
2	75,5	1510				
3	71,3	2140				
4	69,0	2760				
5	67,7	3385				
1	79,4	1588	РВ-20 с ТМР-1800/35 при трех-фазном режиме	9,47	48,5	30,0
2	67,75	2750				
3	64,8	3880				
4	62,7	5016				
5	61,6	6160				

жайшее целое меньшее количество агрегатов — N агрегатов; б) при $N_{опт} > \sqrt{N(N+1)}$ держать в работе $(N+1)$ агрегат.

2. При больших нагрузках подстанции держать включенным резервный агрегат в общем цикле работы.

3. Для обеспечения работы подстанции при оптимальном режиме следует разработать схему автоматического контроля за соблюдением оптимального режима загрузки агрегатов тяговых подстанций.

Литература

1. С. М. Гительсон. Оптимальный режим работы трансформаторов. Электрические станции, № 8, 1939.
2. Н. Костромитин. Тяговые подстанции. Трансжелдориздат, 1940.
3. С. Н. Ляндрес. Методика исследования и испытания элементов тяговых подстанций. Кандидатская диссертация, 1946.



Индукционный зажига́тель ртутных выпрямителей

Инж. И. Д. ШКОЛИН

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Применяемые в настоящее время устройства для зажигания дуги в ртутных выпрямителях являются не вполне совершенными и надежными. Игла зажигания часто отказывает в работе вследствие механических повреждений, системы с ртутно-струйными зажига́телями требуют дополнительной автоматики для повторного зажигания. Простые и надежные системы, работающие

на постоянном токе, требуют дорогостоящих вспомогательных выпрямителей для питания цепей возбуждения и, кроме того, вызывают дополнительные потери энергии.

Недостатки схем зажигания особенно заметны при одноанодных выпрямителях, требующих отдельных устройств зажигания на каждый вентиль (6—12 устройств на каждый выпрямитель).

Работы автора в этой области привели к созданию индукционного зажигающего для ртутных выпрямителей, применение которого значительно упрощает систему зажигания.

Основным элементом новой системы является индукционный зажигатель, работающий на электродинамическом принципе с возвратно-поступательным движением. Энергия, необходимая для зажигания дуги, подводится магнитным полем, что устраняет необходимость отдельного электрического ввода. Зажигатель может самостоятельно осуществлять повторное зажигание дуги. Это упрощает схему зажигания и позволяет выполнить ее без всяких реле. Зажигатель, применяемый для многоанодных выпрямителей, дает возможность вообще исключить систему возбуждения, автоматически зажигая дугу при появлении небольшой нагрузки на главных анодах. При некотором изменении конструкции зажигающего сможет также поддерживать дугу возбуждения в выпрямителе, позволяя отказаться от аппаратуры возбуждения и вспомогательных вводов в конструкции ртутного выпрямителя.

Конструкция индукционного зажигающего показана на рис. 1. Первичная обмотка 1 находится снаружи, а вторичная 2 — внутри выпрямителя. Концы вторичной обмотки выведены вверх и заканчиваются электродами. При питании первичной обмотки переменным напряжением во вторичной обмотке, представляющей собой спираль, концы которой замкнуты ртутью катода, начинает протекать ток. Вследствие электродинамического взаимодействия вторичная обмотка выталкивается вверх, электроды выходят из ртути, изрывая цепь. Образующееся искрение вызывает катодное пятно на поверхности ртути. После выключения первичной обмотки, вторичная обмотка вновь погружается в ртуть благодаря воздействию на нее пружины. Если первичная обмотка остается включенной и зажигание не произошло, процесс автоматически повторяется до возникновения дуги. После возникновения катодного пятна на поверхности ртути первичная обмотка индукционного зажигающего может быть отключена.

Расчет индукционного зажигающего сводится к выбору оптимальных величин индукции в железном стержне (принимается $15\,000 \div 16\,000$ Gs). При подсчете тока должна быть известна величина индуктивного сопротивления вторичной обмотки; последняя, как показали опыты, может быть принята для данной конструкции зажигающего, примерно равной трехкратной величине омического сопротивления катушки.

Опыт показал, что для надежного зажигания дуги нужен определенный минимум напряжения при относительно небольшом токе. Напряжение в катушке не должно быть ниже 7—8 В при токе размыкания 3—4 А.

Для практического осуществления описанной конструкции необходимо было выбрать материал для изоляции вторичной подвижной катушки, который бы отвечал следующим требованиям: а) изоляция не должна загрязнять ртуть и вступать с ней в химическую реакцию; б) изоляция

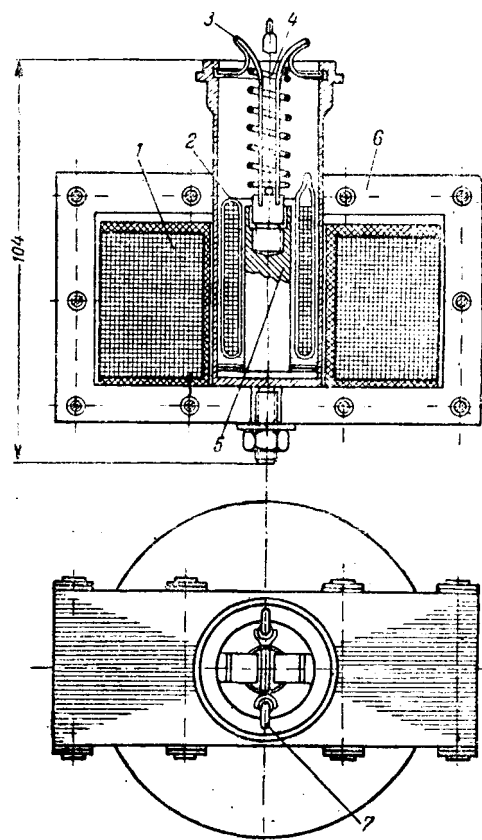


Рис. 1. Конструкция индукционного зажигающего.

1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка; 3 — запирающая пружина; 4 — пружина; 5 — сердечник; 6 — магнитопровод; 7 — иглы электрода.

должна быть нагревостойкой, не должна менять своих свойств при обезгаживании; в) изоляция должна обладать механической прочностью и стойкостью против разрушения при колебательных движениях катушки.

Проведенные испытания показали, что органическая изоляция имеет существенные недостатки, связанные, главным образом, с трудностью обезгаживания. Это заставило отказаться от применения органической изоляции и перейти к неорганическим изоляционным материалам.

К числу наиболее совершенных видов нагревостойкой изоляции, применяемых в отпаянных приборах, относим: стеклоэмаль и микалекс. Наилучшая изоляция вторичной обмотки получена путем запайки катушки, изолированной стекловолокном, в стеклянную или кварцевую ампулу.

При средних значениях индукции в зазоре (порядка 3 000 Gs) сила выталкивания катушки из поля достигает приблизительно 20-кратной величины собственного веса. Благодаря этому зажигание дуги происходит через полпериода после подачи напряжения на внешнюю обмотку. Работа зажигающего иллюстрируется осциллограммами (рис. 2). Катушка выходит из поля в течение одного периода, проходя расстояние около 40 мм. В обычных условиях такой большой скорости движения не требуется, поэтому величина индукции в зазоре может быть уменьшена.

Работы автора в этой области привели к созданию индукционного зажигателя для ртутных выпрямителей, применение которого значительно упрощает систему зажигания.

Основным элементом новой системы является индукционный зажигатель, работающий на электродинамическом принципе с возвратно-поступательным движением. Энергия, необходимая для зажигания дуги, подводится магнитным полем, что устраняет необходимость отдельного электрического ввода. Зажигатель может самостоятельно осуществлять повторное зажигание дуги. Это упрощает схему зажигания и позволяет выполнить ее без всяких реле. Зажигатель, применяемый для многоанодных выпрямителей, дает возможность вообще исключить систему возбуждения, автоматически зажигая дугу при появлении небольшой нагрузки на главных анодах. При некотором изменении конструкции зажигатель сможет также поддерживать дугу возбуждения в выпрямителе, позволяя отказаться от аппаратуры возбуждения и вспомогательных вводов в конструкции ртутного выпрямителя.

Конструкция индукционного зажигателя показана на рис. 1. Первичная обмотка 1 находится снаружи, а вторичная 2 — внутри выпрямителя. Концы вторичной обмотки выведены вверх и заканчиваются электродами. При питании первичной обмотки переменным напряжением во вторичной обмотке, представляющей собой спираль, концы которой замкнуты ртутью катода, начинает проходить ток. Вследствие электродинамического взаимодействия вторичная обмотка выталкивается вверх, электроды выходят из ртути, разрывая цепь. Образующееся искрение вызывает катодное пятно на поверхности ртути. После выключения первичной обмотки, вторичная обмотка вновь погружается в ртуть благодаря воздействию на нее пружины. Если первичная обмотка остается включенной и зажигание не произошло, процесс автоматически повторяется до возникновения дуги. После возникновения катодного пятна на поверхности ртути первичная обмотка индукционного зажигателя может быть отключена.

Расчет индукционного зажигателя сводится к выбору оптимальных величин индукции в железе стержня (принимается $15\,000 \div 16\,000$ Gs). При подсчете тока должна быть известна величина индуктивного сопротивления вторичной обмотки; последняя, как показали опыты, может быть принята для данной конструкции зажигателя, примерно равной трехкратной величине омического сопротивления катушки.

Опыт показал, что для надежного зажигания дуги нужен определенный минимум напряжения при относительно небольшом токе. Напряжение в катушке не должно быть ниже $7-8$ В при токе размыкания $3-4$ А.

Для практического осуществления описанной конструкции необходимо было выбрать материал для изоляции вторичной подвижной катушки, который бы отвечал следующим требованиям: а) изоляция не должна загрязнять ртуть и вступать с ней в химическую реакцию; б) изоляция

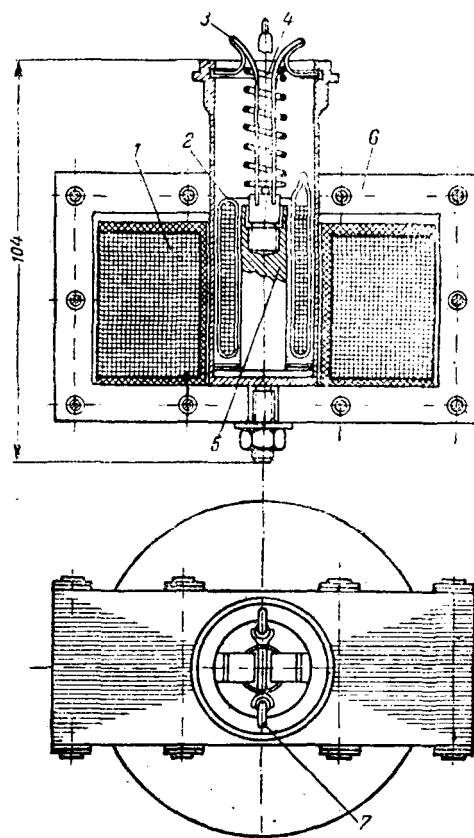


Рис. 1. Конструкция индукционного зажигателя.

1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка; 3 — запирающая пружина; 4 — пружина; 5 — сердечник; 6 — магнитопровод; 7 — иглы электрода.

должна быть нагревостойкой, не должна менять своих свойств при обезгаживании; в) изоляция должна обладать механической прочностью и стойкостью против разрушения при колебательных движениях катушки.

Проведенные испытания показали, что органическая изоляция имеет существенные недостатки, связанные, главным образом, с трудностью обезгаживания. Это заставило отказаться от применения органической изоляции и перейти к неорганическим изоляционным материалам.

К числу наиболее совершенных видов нагревостойкой изоляции, применяемых в отпаянных приборах, относим: стеклоэмаль и микалекс. Наилучшая изоляция вторичной обмотки получена путем запайки катушки, изолированной стекловолокном, в стеклянную или кварцевую ампулу.

При средних значениях индукции в зазоре (порядка $3\,000$ Gs) сила выталкивания катушки из поля достигает приблизительно 20-кратной величины собственного веса. Благодаря этому зажигание дуги происходит через полпериода после подачи напряжения на внешнюю обмотку. Работа зажигателя иллюстрируется осциллограммами (рис. 2). Катушка выходит из поля в течение одного периода, проходя расстояние около 40 мм. В обычных условиях такой большой скорости движения не требуется, поэтому величина индукции в зазоре может быть уменьшена.

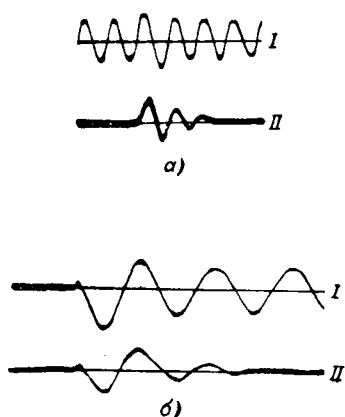


Рис. 2.

a — вторичная обмотка включалась после предварительного включения первичной обмотки; *I* — сила тока в первичной обмотке; *II* — сила тока во вторичной обмотке; *b* — вторичная обмотка включалась одновременно с подачей напряжения в первичную обмотку.

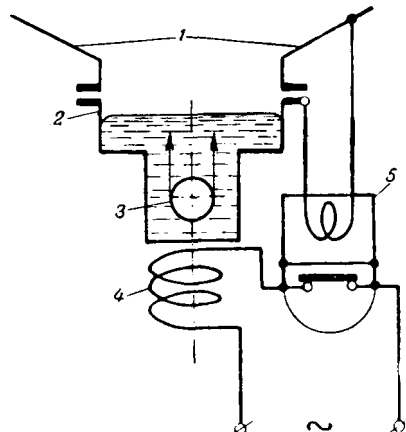


Рис. 3. Схема зажигания РВ.

1 — корпус РВ; 2 — катод РВ; 3 — вторичная обмотка зажигающего; 4 — первичная обмотка зажигающего; 5 — реле.

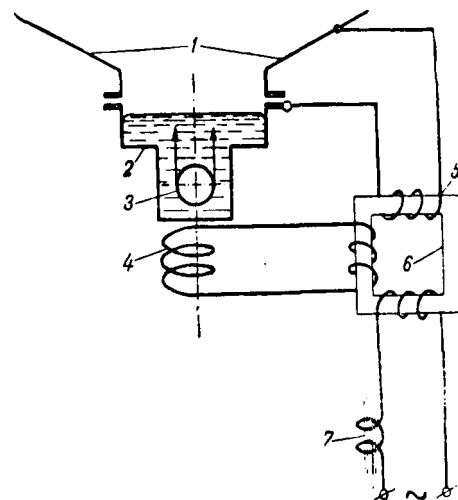


Рис. 4. Схема зажигающего РВ.

1 — корпус РВ; 2 — катод РВ; 3 — спираль зажигающего (вторичная обмотка); 4 — первичная обмотка зажигающего; 5 — намагничивающая обмотка; 6 — трансформатор; 7 — дроссель.

Самой ответственной частью испытаний зажигающего являются электроды. Зажигание дуги может сопровождаться оплавлением наконечников электродов, разрушением изоляции, металлизацией и амальгамированием изолирующих поверхностей. Поэтому особое внимание было уделено испытанию электродов. Число включений и параметры электродов взяты такими, чтобы предупредить неполадки, могущие возникнуть в процессе эксплуатации.

Испытания показали, что спираль с ртутными электродами выдержала 5 000 включений под нагрузкой 500 А_{мах} и 100 включений замкнутого накоротко трансформатора мощностью 300 kVA при напряжении 220 V. При наблюдении за состоянием поверхности кварцевых трубочек было установлено, что металлизация их торцов, несмотря на близость к мощной дуге и малые разрядные промежутки, крайне незначительна.

Электроды с эмалевой изоляцией и вольфрамовыми наконечниками выдержали 250 включений на короткое замыкание при той же мощности трансформатора. После этих испытаний вольфрамовые наконечники не только не оплавившись, а наоборот, покрылись ртутью — амальгамировались, сделавшись, таким образом, нечувствительными к оплавлению, как и ртутные электроды.

Результаты испытаний показали, что трубчатые электроды оставались чистыми, а вольфрамовые наконечники не дали оплавлений. Окончательное заключение о надежности и устойчивости зажигающего следует сделать после длительного периода эксплуатации промышленной установки.

В многоанодных конструкциях выпрямителей индукционный зажигающий устраняет необходи-

мость в дежурной дуге. Конструкция этого зажигающего не отличается от описанной выше. Зажигающий при небольшой скорости может производить колебательные движения сколь угодно длительное время. Во время холостого хода выпрямителя индукционный зажигающий создает ритмичное искрение до появления нагрузки. Для этого включение индукционного зажигающего должно зависеть от напряжения между катодом и корпусом, которое исчезает во время погасания дуги. Автоматизировать процесс зажигания можно применением электромагнитного реле (рис. 3) или специальной схемой с насыщенным дросселем (рис. 4).

Описанная система при известном усовершенствовании может работать не только как зажигающий, но и как возбудитель. Для этого средняя точка вторичной обмотки замыкается ртутью катода через специальный вывод, а концы этой обмотки заканчиваются небольшими анодами.

Наконец, при помощи этого устройства поновому может быть решен вопрос регулирования выпрямленного напряжения. Если экранировать один из анодов дежурной дуги, то другой своим потенциалом создает заслон выходу пятна, и тогда, смещая фазу напряжения возбуждения относительно фазы напряжения главного анода, можно изменять во времени момент зажигания главного анода и обеспечивать регулирование выпрямленного напряжения.

При указанном выполнении аппарат управления делает как конструкцию самого выпрямителя, так и его схему предельно элементарными, позволяя исключить всю аппаратуру возбуждения, а у выпрямителя ограничиться только одним электрическим вводом для главного анода.

К статье А. М. Залесского „Профилактические испытания изоляции электрических машин“¹

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, № 2, 1948)

Инж. В. П. РОСТОВЦЕВА

Азэнерго

Соглашаясь с А. М. Залесским в оценке «старых» способов испытаний, я все же нахожу, что испытание напряжением постоянного тока рекомендуемой величины может не выявить дефектов в такой степени, как испытание напряжением переменного тока.

Проведенные нами опыты над отдельными, находящимися вне машины, секциями дали кратность пробивного напряжения при постоянном токе по отношению к «зрелому», равную двум (при выдержке под напряжением в течение 1 мин). Исходя из установленного нормами испытательного напряжения переменного тока $1 \div 1,3 U_{ном}$, получим для постоянного тока $U_{исп} = 2 \div 2,6 U_{ном}$. Учитывая различный характер распределения напряжения для постоянного и переменного тока при собранной машине, я считаю, что для обеспечения запаса прочности в отношении рабочего напряжения, которое воздействует длительное время и при более высокой температуре, величину испытательного напряжения постоянного тока следует принимать не менее $3 \div 4 U_{ном}$.

Пока не накоплено достаточного опыта по испытанию постоянным током, целесообразно для машин высокого напряжения ввести это испытание как дополнительное помимо испытаний переменным током.

Старения изоляции от действия повышенного напряжения переменного тока по-моему можно не опасаться ввиду незначительной его величины ($1 \div 1,3 U_{ном}$) и кратковременности приложения (1 мин.), тем более, что испытания должны производиться только один раз в год. Для роторов и для машин низкого напряжения, для которых кратность испытательного напряжения по отношению к номинальному велика, лучше во избежание ослабления изоляции производить испытание постоянным током.

Как на одно из преимуществ испытания постоянным током А. М. Залесский указывает на возможность обнаружения местных дефектов по току утечки. Однако, наш опыт этого не подтверждает. Ток утечки имеет значительную величину по сравнению с общим током через изоляцию машины только в том случае, если дефектом является местное отсыревание, что для электрических машин мало вероятно. Местное отсыревание больше свойственно кабельной изоляции. При коротких кабелях по величине тока утечки очень хорошо выявляются дефекты в концевых разделках или вследствие сквозных повреждений свинцовой оболочки с последующим попаданием влаги. При отсыревании же электрических машин сырость распространяется по значительной части изоляции и утечка через дефектное место на общем фоне большого тока утечки останется незамеченной.

При местных механических или электрических повреждениях изоляции ток утечки даже при сквозном дефекте бывает очень мал до тех пор, пока не наступает полного пробоя. Для секций электрических машин номинальным

напряжением 6 kV ток утечки при испытательном напряжении возрастает всего на $5 \div 7 \mu A$ по сравнению с током той же секции до повреждения. Даже при появляющемся в дефектном месте искрении по пути прохождения тока утечки его величина до пробоя не изменяется. Пробой сопровождается резким, скачкообразным возрастанием тока утечки до тока короткого замыкания. В случае несквозных дефектов, когда часть изоляции остается неповрежденной, ток утечки вообще практически не увеличивается, пока не наступит пробой. Все это говорит о том, что возлагать надежды на возможность определения дефектов по току утечки не приходится и, следовательно, испытание как постоянным, так и переменным током может служить только для обнаружения путем пробоя достаточно развившихся дефектов. Несмотря на это, способ испытания повышенным напряжением как переменного, так и постоянного тока является до сих пор единственным более или менее надежным способом, требующим, однако, большой доработки в части величины напряжения и времени выдержки.

А. М. Залесский рекомендует применять при испытании междувитковой изоляции электрических машин способ импульсного генератора. Этот способ представляет большой интерес уже потому, что никаких заключений о состоянии витковой изоляции после ряда проведенных испытаний мы дать не можем. Однако, к недостаткам его относится то, что выявляются только полностью замкнутые витки, слабость же витковой изоляции не устанавливается.

У нас делались испытания витковой изоляции отдельных секций как вне машины, так и заложенных в пазы. Испытания производились по методу сравнения индуктивных сопротивлений двух секций для машин напряжением 6 kV. При этом удавалось обнаруживать только явные дефекты, несмотря на то, что импульсное напряжение, приходящееся на секцию, составляло 6 kV, а между витками — 1,5 kV. При воздушном зорле или слове изоляции между витками дефектное место не выявлялось.

К сожалению, А. М. Залесский не приводит теоретических соображений по вопросу неравномерности распределения импульсного напряжения по начальным и конечным виткам и хотя бы ориентировочного обоснования величины напряжения, которое должно быть приложено, чтобы на витках у нейтрали получилось достаточное испытательное напряжение. В то же время при значительной величине подводимого импульсного напряжения может появиться опасность нарушения целостности изоляции первых витков в отношении корпуса и других фаз. Также не освещен вопрос испытания машин при соединении в треугольник. Как и все способы, связанные с применением высокого напряжения, способ испытания импульсным генератором небезопасен для изоляции машины, так как могут иметь место частичные сквозные пробой, ослабляющие изоляцию. Все же отказываться от этого способа не следует, так как только широкое применение в эксплуатации может окончательно выявить его положительные и отрицательные стороны. Применение его желательно для машин высокого напряжения; для машин низкого напряжения при напряжении 10 kV, которое рекомендуется подводить при испытании, этот способ по-моему не безопасен.

¹ Окончание дискуссии; начало — № 2, 1948.

Г. И. ЛЫСАКОВСКИЙ

Донбассэнерго

В статье освещается очень актуальный вопрос, однако постановка его поверхностна, отечественная литература совершенно недостаточно использована, а никакого нового материала А. М. Залесским не приводится.

Испытание главной изоляции выпрямленным напряжением. А. М. Залесским одобряется только один способ испытания главной изоляции — помощью выпрямленного напряжения с замером токов утечки. Этот способ, как указывает А. М. Залесский, имеет замечательное свойство — выявлять местные дефекты.

Напомним, что, как было установлено рядом авторов [Л. 2, 4, 5], непропорциональное напряжению увеличение токов утечки наблюдается только для сквозных трещин со следами проводимости в них. Несквозные трещины (а таких большинство) этим способом не могут быть выявлены.

Имеющийся трехлетний эксплуатационный опыт системы Кермеровэнерго [Л. 2, 3] по применению выпрямленного напряжения для генераторов ($1 \div 1,5$) $U_{исп}$, а для двигателей ($2 \div 2,5$) $U_{исп}$, очевидно, неизвестный А. М. Залесскому, а также более внимательное изучение материала, упомянутого в статье А. М. Залесского, позволяет установить следующее:

1. В использованной А. М. Залесским статье Davis и Liftwich (El. Eng., № 1, 1942) указано, «что из 18 пробоев генераторов при испытании только в двух случаях было замечено возрастание токов утечки».

2. В неиспользованной А. М. Залесским статье [Л. 3] приводятся союзные данные для двигателей 3 kV, из которых видно, что из пяти пробитых при испытании двигателей (из 57 испытанных) только на двух наблюдалось резкое — больше, чем в три раза, понижение сопротивления при повышении напряжения от $1,5 \div 2,5$ до $4 \div 7$ kV.

3. Анализ результатов испытаний двигателей 3 kV [Л. 3] показывает, что в 90% случаев нельзя было установить зависимость частоты повреждаемости при испытаниях от увеличения тока утечки (от 1- до 3-кратного), обусловленного повышением испытательного выпрямленного напряжения от 2,5 до $7 \div 8$ kV_{мах}.

4. Одна из фаз статора генератора 10,5 kV завода «Электросила» типа Т-2-25-2 за время с 1944 по 1947 г. показывала систематическое понижение сопротивления, тогда как для двух других фаз оно оставалось неизменным; на этой же фазе замечалось также резкое понижение сопротивления при подъеме напряжения от 2,5 до 10 kV [Л. 2]. Между тем, в 1947 г. была пробита не «дефектная» фаза, а «здоровая» при приложении переменного напряжения 10,5 kV ($1,0 U_{ном}$).

Таким образом, в отношении выявления местных дефектов указанный метод, как и другие, имеет ограниченную ценность и должен быть рассматриваем, как один из элементов общего комплекса испытаний. Для повышения эффективности испытаний необходимо применение достаточно высокого испытательного напряжения, причем пробои, вероятно, будут иметь место без предварительного понижения сопротивления, т. е. в этом отношении испытание выпрямленным напряжением не будет иметь преимуществ против испытания переменным напряжением.

Выбор величины испытательного напряжения. По нашему мнению, для решения вопроса о выборе величины испытательного напряжения необходимо было рассмотреть следующие вопросы:

1. Вероятность появления перенапряжений той или иной амплитуды.

2. Изменение электрической прочности машины по мере развития дефектов.

3. Соотношение между значениями электрической прочности для различного рода перенапряжений (переменного, постоянного, высокочастотного).

А. М. Залесский ограничился приведением лишь двух отдельных, по существу говоря, необоснованных положений, а именно:

1. Ссылаясь на уже устаревшую инструкцию НКЭС (1944 г.), он принимает напряжение $1,3 U_{ном}$ «вполне безопасным» для изоляции, а напряжение $1,0 U_{ном}$ — «безусловно безопасным».

2. Ссылаясь на свои работы, он предлагает принять соотношение между электрической прочностью на постоянном и переменном токе равным 2, а по каким-то другим соображениям, которых он не приводит, 1,41.

Рассмотрение вопроса о выборе испытательных напряжений в разрезе трех вышеуказанных предпосылок было сделано в докладе на XXXII пленуме Всесоюзного бюро электрической изоляции (Всесоюзная конференция по эксплуатации высоковольтной электрической изоляции) [Л. 2].

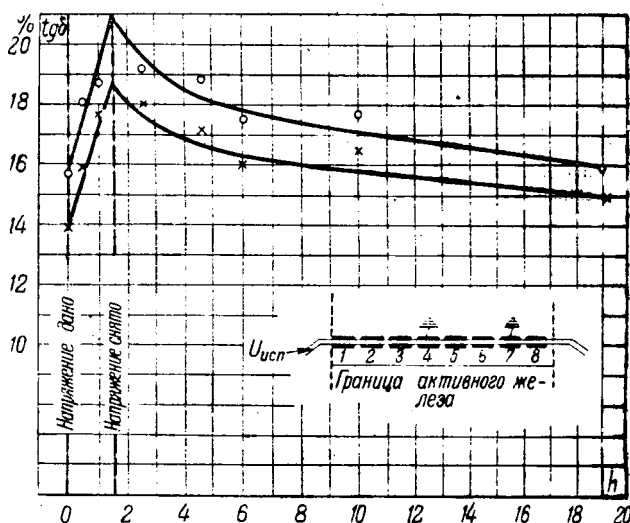
Было показано несоответствие испытательных напряжений ($1 \div 1,3$) $U_{ном}$ в СССР и ($1 \div 1,5$) $U_{ном}$ за границей уровню большинства встречающихся перенапряжений для различных сетей — в пределах $1,0 U_{ном}$ — длительных и до ($1,5 \div 1,8$) $U_{ном}$ — кратковременных. Предложено повышение испытательных напряжений до ($1,5 \div 1,75$) $U_{ном}$ на переменном токе, а для изношенной изоляции — ($2,0 \div 2,5$) $U_{ном}$ на постоянном, с учетом характера нагрузки и состояния изоляции. Допустимость такого повышения подтверждена рядом материалов, в том числе данными о средней электрической прочности $U_{пр}$, выраженной в кратности к $U_{ном}$.

а) Для новых машин по данным ХЭМЗ [Л. 6] при $U_{ном} = 3$ kV, $U_{пр} = 4,5 U_{ном}$, а для $U_{ном} = 6$ kV; $U_{пр} = 8 U_{ном}$.

б) Для эксплуатируемых машин по данным Эдисоновского института [Л. 5] для $U_{ном} = 6,6 \div 7,8$ kV; $U_{пр} = 5,3 U_{ном}$; для $U_{ном} = 11,4 \div 12$ kV; $U_{пр} = 3,4 U_{ном}$; по нашим данным для сильно изношенных двигателей $U_{ном} = 3$ kV; $U_{пр} = (2,6 \div 5) U_{ном}$.

Опасность воздействия ионизации. Утверждения А. М. Залесского об опасности ионизационных процессов для изоляции также не подкрепляется никакими экспериментальными дополнительными данными. Как известно, мнения по этому поводу различны, а убедительных данных почти нет.

Результаты наших опытов с двумя отдельными участками стержня обмотки статора генератора 15,75 kV мощностью 100 000 kW показывают, что при ионизации возникают обратимые процессы. Приложение переменного напряжения $2 U_{ном}$ в течение 90 мин вызвало увеличение



Зависимость $\tan \delta$ от времени после приложения и после снятия напряжения двух участков изоляции статора генератора Г-1500-118-15,75 ХТЗ (мощность 100 тыс. kW, $U_{ном} = 15,75$ kV), пазовая часть; напряжение $U_{исп} = 2,0 U_{ном}$ (переменного тока) дано на $1\frac{1}{2}$ часа. Замер угла потерь произведен неравномерным мостом при 10 kV (данные Г. И. Лысаковского и Склярова).

$\text{tg } \delta$ от $14 \div 16\%$ до $19 \div 21\%$; затем после снятия напряжения угол потерь уменьшался и через 20 ч достиг примерно прежнего значения (рисунок).

Литература

1. Решения Всесоюзной научно-технической сессии по эксплуатации высоковольтной электрической изоляции. Ростов на-Дону, апрель 1947.
2. Г. И. Лысаковский. За повышение эффективности испытаний главной изоляции вращающихся высоковольтных машин. Доклад на Всесоюзной научно-технической сессии по эксплуатации высоковольтной электрической изоляции.
3. Г. И. Лысаковский. Повреждения изоляции статоров моторов собственных нужд станций. Эл. станции. № 11, 1946.
4. A. C. Smith. Generator Insulation Testing Progress. El. World, 1943.
5. Field Testing of Generator Insulation. El. Eng., № 12, 1941.
6. О. Б. Брон. Выбор системы изоляции для машин переменного тока. Госэнергоиздат, 1935.

Инж. В. В. ПУЧКОВСКИЙ

Челябэнергo

Рассматривая весьма важный и далеко еще не решенный вопрос о системе профилактических испытаний изоляции электрических машин, А. М. Залесский счел возможным свести его к двум, весьма сомнительным, рекомендациям: замене переменного испытательного напряжения выпрямленным — для главной изоляции и импульсным — для витковой изоляции.

С выводами, сделанными А. М. Залесским, аргументированными к тому же весьма неубедительно, согласиться нельзя.

Так, данные эксплуатации, которыми мы располагаем, дают следующую картину распределения пробоев главной изоляции машин при годичном интервале между испытаниями:

Объекты испытаний	Испытательное напряжение	Распределение пробоев, %		
		При испытании	В работе	Всего
Генераторы 10 кВ Электродвигатели 3 кВ	Переменное $1,0U_{\text{лин}}$	50	50	100
	Переменное $1,65U_{\text{лин}}$	90	10	100
	Выпрямленное $3,0U_{\text{лин}}$	43	57	100

Из приведенных данных следует, что:

а) Испытание переменным напряжением, равным $U_{\text{лин}}$, предупреждает лишь половину возможных эксплуатационных пробоев. Повышение испытательного напряжения до $1,65 U_{\text{лин}}$ позволяет предупредить уже около 90% пробоев. Таким образом, применение переменного испытательного напряжения равного $(1,5 \div 1,7) U_{\text{лин}}$ для главной изоляции машин эффективно и оправдано.

б) Испытание выпрямленным напряжением, равным $3U_{\text{лин}}$, по своей эксплуатационной эффективности несколько уступает испытанию переменным напряжением, равным $U_{\text{лин}}$. Таким образом, для достижения необходимой эффективности испытания выпрямленным напряжением его следует увеличить, грубо говоря, до $(4 \div 6) U_{\text{лин}}$.

Отсюда следует, что замена испытательного переменного напряжения выпрямленным, если ее целесообразность вообще будет доказана, не столь проста, как это представляется А. М. Залесскому, а рекомендуемое им испытательное выпрямленное напряжение $1,84 U_{\text{ном}}$ явно не сможет обеспечить надежную работу изоляции машин. Испытание изоляции должно проводиться в условиях, сходных с эксплуатационными, в связи с чем переход к выпрямленному напряжению вряд ли целесообразен. Если ис-

ходить из условия равнопрочности, кратность напряжения при испытании витковой изоляции также следует несколько увеличить.

Что касается импульсных испытаний витковой изоляции, то применение высоких испытательных градиентов, особенно в связи с кумулятивным эффектом, рискованно.

Достоин удивления позиция, занятая А. М. Залесским в части вспомогательных измерений: угла потерь, токов абсорбции, частичных разрядов и т. д. Правда, ни один из этих методов контроля не является универсальным, но, взаимно дополняя друг друга, они, бесспорно, способствуют выявлению дефектов.

Заведомо неправильно, в частности, заявление автора о целесообразности измерения угла диэлектрических потерь. Так, генератор, изоляция которого имеет $\text{tg } \delta$ $12 \div 20\%$, в течение 8 лет эксплуатации повреждался дважды; генераторы с углом потерь $3 \div 10\%$ за много лет работы повреждений не имели.

Инж. В. И. ПОГАРСКИЙ

Оргрзс

В статье А. М. Залесского правильно отмечено, что проводившиеся до настоящего времени профилактические испытания электрической изоляции машин были мало эффективными. Указывая на то, что наиболее распространенными дефектами изоляции машин являются различные сосредоточенные (местные) повреждения, А. М. Залесский делает вполне обоснованный вывод и правильное предложение широко применять на практике испытания изоляции машин постоянным током высокого напряжения. Более сложно обстоит вопрос с выбором и установлением величины испытательного напряжения постоянного тока.

А. М. Залесский принимает для электрической изоляции машин, как минимум, отношение пробивных напряжений на постоянном и на переменном токе равным двум. Как известно, это отношение зависит от времени приложения испытательного напряжения $t_{\text{исп}}$, так как прочность изоляции по мере увеличения $t_{\text{исп}}$ на переменном токе понижается значительно быстрее, чем на постоянном токе. Для интересующих нас промежутков времени ($t_{\text{исп}} = 0,5 \div 1,0 \text{ мин}$) указанное отношение может быть ориентировочно принято равным $2 \div 2,5$. Задаваясь вполне безопасным для здоровой изоляции допустимым испытательным напряжением переменного тока в пределах $1 \div 1,3 U_{\text{ном}}$, найдем испытательное напряжение постоянного тока

$$U_{\text{пост}} = (1 \div 1,3) U_{\text{ном}} \cdot (2,0 \div 2,5) = (2 \div 3,2) U_{\text{ном}} = (3,5 \div 5,5) U_{\text{фаз}},$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное (линейное) напряжение машины; $U_{\text{фаз}}$ — фазовое напряжение машины (по отношению к земле).

В этом диапазоне и заданы А. М. Залесским испытательные напряжения постоянного тока, приведенные в табл. 1. Еще рациональнее было бы принять сравнительно более высокие испытательные напряжения для новых машин ($\sim 4,5 \div 5 U_{\text{фаз}}$) и пониженные ($\sim 3 \div 4 U_{\text{фаз}}$) для машин, проработавших более $100 \div 120$ тыс. ч.

Нельзя полностью согласиться с мнением А. М. Залесского по вопросу применения повышенного напряжения переменного тока. Применяемые в настоящее время испытательные напряжения переменного тока ($U_{\text{ном}}$) весьма ограничены и заметного вреда здоровой изоляции машин принести не могут. В то же время, как показывает практика, при таких испытаниях выявляются дефекты изоляции машин.

Следует считать вполне правильными решения XXXII пленума Всесоюзного бюро электрической изоляции (1947 г.), в которых указывается, во-первых, на необходимость применять испытания изоляции машин повышенным напряжением переменного тока и, во-вторых, на необходимость увеличения этих испытательных напряжений.

А. М. Залесский предлагает отказаться от измерений диэлектрических потерь изоляции машин, как способа про-

филактических испытаний. Это было бы неправильно. Пренебрегать, в частности, долголетним опытом Мосэнерго, освещенным в статье Б. П. Бурьянова, не следует. В настоящее время можно насчитать большое количество генераторов, проработавших 100—120 тыс. ч (15—20 лет). Однако, установив действительную необходимость замены изоляции всех этих машин не так просто, как это представляется А. М. Залесскому, и тем более явно нецелесообразно заменять их изоляцию без разбора, руководствуясь только сроком работы.

Систематические замеры диэлектрических потерь в начале (~15 лет) через каждые 3—5 лет и в последующем — ежегодно, как следует из опыта Мосэнерго, могут дать весьма полезные сведения о процессе старения изоляции.

Старение изоляции статорных обмоток происходит неравномерно; в большей мере стареет изоляция стержней (или катушек), расположенных ближе к линейным выводам и находящимся под воздействием более высоких градиентов электрического поля. Для установления старения изоляции этих частей обмоток измерение диэлектрических потерь возможно производить при нормальном распределении градиентов по обмоткам, т. е. не от постороннего испытательного трансформатора, а на вращающейся возбужденной машине. Проведенные по такой методике испытания изоляции нескольких машин дали благоприятные и интересные результаты [Л. 1].

В ряде случаев, при капитальных ремонтах машин, имеется возможность раздельного испытания частей обмоток при выборочной распайке лобовых соединений.

Наконец, следует указать, что часто измерения диэлектрических потерь изоляции машин проводятся недостаточно точно.

Нельзя согласиться с А. М. Залесским и по вопросу оценки им метода снятия абсорбционных кривых заряда и разряда. Слоистая изоляция машин содержит в качестве одной из компонент лаковую основу, нормально представляющую вязкую среду.

Под воздействием приложенного напряжения в лаковых прослойках имеют место дипольные явления, обуславливающие протекающие абсорбционные токи. Большая неоднородность машинной изоляции (слода, лака, бумага), также может обусловить свою слагающую в общем абсорбционном токе, протекающем через сложный диэлектрик. В новой и старой изоляции характер протекания этих токов, выражающийся абсорбционными кривыми, различен. Особенно ценны и интересны будут абсорбционные кривые, снятые в начальные промежутки времени после приложения испытательного напряжения. Поэтому нельзя согласиться с А. М. Залесским в том, что метод снятия абсорбционных кривых «может дать указание только на малые влажностные в машине». Возможности способа снятия абсорбционных кривых должны быть всесторонне изучены и использованы для целей профилактических испытаний изоляции электрических машин.

Литература

1. Материалы Всесоюзного совещания по борьбе с грозowymi авариями. Ленинград, 1938.

**Доктор техн. наук,
проф. А. М. ЗАЛЕСКИЙ**

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Значительное число высказавшихся в дискуссии по моей статье и разнообразие высказанных в ней взглядов свидетельствуют о том, что вопрос о профилактических испытаниях электрических машин поставлен своевременно. Приходится, однако, выразить большое сожаление по поводу того, что в дискуссии не приняли участия представители наших электромашиностроительных заводов и энергетиков других министерств, кроме Министерства электростанций. Мнение электромашиностроительных заводов по этому вопросу было бы очень важно. Не менее интересно было бы услышать мнение энергетиков заводов, эксплуатирующих электрические машины, так как на этих заводах

вопросы профилактики изоляции электрических машин едва ли стоят на такой высоте, как на электростанциях МЭС.

Основной целью моей статьи было привлечь внимание наших электротехнических кругов к вопросу о профилактике изоляции электрических машин, так как этот вопрос, что подтверждает и дискуссия, не находится в ясном и удовлетворительном состоянии. Особенно важным я считаю привлечь к этому вопросу внимания заводских энергетиков, так как внедрение в их практику профилактики электрических машин, в частности профилактики их изоляции, может иметь очень большой народнохозяйственный эффект. Привлечение к этому вопросу внимания инженеров МЭС важно по другой причине. Располагая весьма квалифицированными кадрами и имея возможность суммировать их опыт, МЭС более чем кто-либо может организовать широкое опробование новых методов профилактики и отобрать из них наилучшие.

Наибольшие споры вызвало мое предложение о широкое применение профилактического испытания высоким выпрямленным напряжением и о величине испытательного напряжения. Большинство высказавшихся в дискуссии считает применение этого испытания полезным и необходимым, только В. В. Пучковский считает необходимость его сомнительной. По мнению И. А. Сыромятникова введение испытания высоким выпрямленным напряжением преждевременно. Повидимому, И. А. Сыромятников считает введение этого испытания преждевременным только по отношению к генераторам всех напряжений и к двигателям на 6 кВ, так как двигатели на меньшие напряжения уже подвергаются этому испытанию, как он сам и указывает. Л. Г. Мамиконянц также считает, что рано рекомендовать это испытание для широкого применения и необходимо предварительно изучить его на нескольких десятках объектов. Все остальные участники дискуссии соглашались с полезностью его и спорят лишь о величине испытательного напряжения.

Предлагаемые величины испытательных напряжений колеблются в очень широких пределах. Наиболее далеко в сторону повышения испытательных напряжений идет в своем высказывании В. В. Пучковский, несмотря на высказанное им сомнение в пользе самого испытания. Он предлагает испытательное напряжение в пределах от $4 U_n$ до $6 U_n$ (U_n — номинальное линейное эффективное напряжение). Наиболее низкое испытательное напряжение предлагает М. И. Рапопорт, который считает, что оно должно быть выше $1,44 U_n$ и ниже $1,85 U_n$.

Заслуживают внимания предложения М. В. Хомякова и В. И. Погарского дифференцировать испытательные напряжения, хотя направления дифференциации у них различны. М. В. Хомяков предлагает различные испытательные напряжения для различных условий работы генераторов и устанавливает 4 ступени испытательных напряжений (от U_n до $2 U_n$). В. И. Погарский предлагает более высокие испытательные напряжения для машин, работавших менее 100—120 тыс. час. ($\sim 2,6 \div 2,9 U_n$), и менее высокие ($\sim 1,7 \div 2,3 U_n$) для машин, работавших более этого времени. Учитывать условия работы машин предлагает и Г. И. Лысаковский. Принцип дифференциации испытательных напряжений кажется мне по существу правильным, но я сомневаюсь, чтобы в настоящее время были достаточные данные для обоснования как направления дифференциации, так и величины испытательных напряжений разных ступеней.

Отмеченное мною различие мнений, высказанных в дискуссии как по вопросу о необходимости применения испытания высоким выпрямленным напряжением, так и по вопросу о величине испытательного напряжения, свидетельствует о том, что этот вопрос еще очень мало изучен. Поэтому совершенно правильно предложения произвести предварительно исследование этого метода испытания на более или менее значительном числе объектов (Л. Г. Мамиконянц) или ввести его сначала как дополнительный (В. П. Ростовцева), что вполне совпадает с предложением, которое я сделал в моей статье: «желательно поставить в ряде систем профилактическое испытание повышенным постоянным напряжением для накопления опыта и установления на основании этого опыта более обоснованных величин испытательного напряжения». К это-

му предложению я хочу добавить еще и другое: необходимо поставить также лабораторное исследование изоляции машин выпрямленным напряжением, для того чтобы выяснить действительное соотношение электрической прочности изоляции при постоянном и переменном напряжении. Без этого надежное установление испытательных напряжений будет очень затруднительно. Отмечу, что на необходимость постановки испытаний повышенным выпрямленным напряжением для изучения этого метода и накопления опыта указывает также резолюция Научно-технической сессии ВНИТОЭ по эксплуатации высоковольтной изоляции, происходившей в апреле 1947 г. в Ростове на-Дону.

Переходя к вопросу о величине испытательного выпрямленного напряжения, я хочу отметить, что предложенный мною уровень испытательных напряжений был мною выбран с крайней осторожностью. Почти все участники дискуссии считают возможным установить более высокий уровень. Я охотно соглашаюсь с этим предложением и полагаю, что в первом приближении кратность испытательного напряжения можно было бы повысить до $(2,5 \div 3) U_n$. Необходимо помнить, что этот уровень испытательного напряжения я предлагаю для постановки испытаний в нескольких системах с целью накопления опыта, который в дальнейшем позволит установить этот уровень более точно и, быть может, дифференцировать его.

Ряд участников дискуссии указывает на необходимость сохранить испытание повышенным переменным напряжением. М. И. Рапопорт указывает на неясность моей позиции по этому вопросу. Поясню ее. Я считаю испытание повышенным переменным напряжением достаточно эффективным, если напряжение достаточно высоко. Действующие в настоящее время нормы $(U_n \div 1,3 U_n)$ слишком низки. Повышение испытательного напряжения до $1,5 \div 1,7 U_n$ (что предлагают также Г. И. Лысаковский и В. В. Пучковский) я считаю целесообразным. Я согласен с М. И. Рапопортом, что пока это испытание является наиболее эффективным и необходимым. Однако, оно имеет по сравнению с испытанием выпрямленным напряжением следующие минусы: 1) оно хуже выявляет местные дефекты; 2) оно требует более тяжелой аппаратуры, особенно при испытаниях наиболее мощных генераторов; 3) оно может несколько ослаблять изоляцию. Правда, это ослабление незначительно и решающей роли, конечно, иметь не может. Все же два первых минуса достаточны для того, чтобы можно было высказаться в пользу испытания постоянным напряжением. Возможность объединить последнее с абсорбционным испытанием представляет еще одно преимущество испытания постоянным напряжением.

Второе предложение, сделанное в моей статье, — применить для профилактического испытания междувитковой изоляции импульсный метод — большинство участников дискуссии поддерживает с оговоркой, которую делал и я, потому что он требует предварительной разработки и опробования. В. П. Ростовцева и В. В. Пучковский опасаются того, что применение высоких импульсных напряжений может быть опасно для изоляции. Такая опасность существует при каждом испытании высоким напряжением, если оно превосходит некоторый предел. Задача разработки методики испытания как раз в том и заключается, чтобы установить этот безопасный предел. Замечу, что работа по исследованию импульсной прочности изоляции электрических машин, недавно законченная в Лаборатории высоких напряжений ЛПИ, дает некоторый исходный материал для выяснения этого вопроса.

Два метода, о которых я говорил выше, — испытание изоляции на корпус выпрямленным напряжением и испытание междувитковой изоляции импульсами — должны стать, по моему мнению, основными после их окончательной разработки и опробования. Мне кажется, что дискуссия подтвердила эти положения. Само собою разумеется, что до окончательного их введения должно оставаться в силе испытание повышенным переменным напряжением.

Переходя к другим методам, подвергшимся дискуссии, я должен констатировать, что по вопросу об испытании угла потерь мнения разошлись. И. А. Сыромятников и Л. Г. Мамикович считают его бесполезным, ряд других участников дискуссии считают его полезным для оценки изменений общего состояния изоляции. Мое мнение совпа-

дает с мнением И. А. Сыромятникова и Л. Г. Мамиковича. Я полагаю, что этот метод скоро отомрет.

Многие из выступавших в дискуссии очень ратуют за метод абсорбции. Я считал и считаю, что этот метод не может быть основным. Однако, некоторые высказывания участников дискуссии и некоторые новые данные об этом методе склоняют меня к мысли о том, что он может быть полезен как дополнительный. Применение его легко может быть объединено с испытанием, повышенным выпрямленным напряжением и такая комбинация может оказаться очень эффективной, особенно при испытании двигателей.

Применение индикатора частичных разрядов ряд участников дискуссии считает полезным, но почти все считают его недостаточно разработанным. Я полагаю поэтому, что мое мнение о невозможности принять этот метод в качестве основного не поколеблено. Однако, я считал и считаю, что он может применяться в качестве дополнительного метода. Более широкое применение его для накопления опыта я считаю желательным.

В заключение я позволю себе остановиться на двух выступлениях, подвергавших мою статью резкой критике.

И. А. Сыромятников упрекает меня и в том, что моя статья не дает ничего нового для работников эксплуатации, что я не знаю эксплуатационных циркуляров Технического отдела МЭС и опорачиваю существующие методы испытаний без достаточных оснований. Очень обидело его также якобы высказанное мною утверждение о том, что в системе МЭС не применяется профилактического испытания двигателей.

Я отнюдь не претендую на то, что моя статья содержит в себе какие-нибудь новые открытия. Цель моей статьи, как выше указано, заключалась в том, чтобы привлечь к вопросу о профилактических испытаниях изоляции электрических машин внимание нашей технической общественности. И. А. Сыромятников напрасно относит все сказанное в моей статье только к МЭС. Я прекрасно знаю, что МЭС располагает высококвалифицированными кадрами, которые поставили дело профилактического испытания электрооборудования электростанций на такую высоту, которой оно не достигло нигде за границей. Однако, я обращал свою статью не только к работникам МЭС, но и к энергетикам заводов и иных промышленных предприятий, где дело это стоит совсем не на том уровне, как в МЭС. Кстати, я нигде не говорил, что в системе МЭС не применяется профилактического испытания двигателей. По этому поводу я сказал только следующее: «Профилактическое же испытание двигателей, даже крупных, применяется редко, а на подавляющем большинстве заводов и вовсе не применяется». Где же здесь упоминание о МЭС?

Упрек в незнании эксплуатационных циркуляров МЭС я должен принять. Действительно, не будучи работником МЭС и не будучи в настоящее время связан с МЭС по своей научной работе, я этими циркулярами не располагал во время написания статьи. Ознакомившись с ними, я с удовлетворением узнал, что МЭС начало применять испытание выпрямленным напряжением (правда, это испытание рекомендуется только в случае отсутствия соответствующего испытательного оборудования переменного тока).

Упрек в том, что я опорачиваю без достаточных оснований существующие методы профилактических испытаний, несправедлив. Я не считаю испытание меггером профилактическим и полагаю, что в этом я прав. Я не вижу большой пользы от измерения угла потерь, — и в этом И. А. Сыромятников со мною, повидимому, согласен. Испытание повышенным переменным напряжением я вовсе не считаю легким. Вывод моей статьи по поводу этого испытания таков: «это испытание дает возможность выявить дефектные места в изоляции обмотки машины с достаточной надежностью, но имеет тот минус, что ослабляет изоляцию обмотки. Вторым минусом, и притом существенным, является то, что в случае машин большой мощности и наиболее высоких напряжений оно требует тяжелого оборудования (сравнительно мощный испытательный трансформатор)».

Отсюда совершенно ясно, что я признаю испытание повышенным переменным напряжением достаточно надежным. Далее, я признаю, что этот метод имеет два минуса: один — с у щ е с т в е н н ы й (тяжелое испы-

тательное оборудование) и второй — несущественный (ослабление изоляции обмотки).

Таким образом, обвинение в том, что я без достаточных оснований опорачиваю существующие методы профилактических испытаний, неправильно.

Г. И. Лысаковский упрекает меня в том, что в своей статье я не использовал его работ. Работы Г. И. Лысаковского (опубликованные) я знаю и ценю. Однако, я должен сказать Г. И. Лысаковскому, что его неопубликованные работы (а таким является его доклад на научно-технической сессии ВНИТОЭ по эксплуатации высоковольтной изоляции) я, конечно, использовать не мог. Этот доклад я не мог бы использовать, даже если бы он появился в печати после окончания сессии, по той причине, что статья моя была мною написана в 1946 г. и послана в журнал «Электричество» в январе 1947 г.*.

Перехожу к существу замечаний Г. И. Лысаковского.

1) Г. И. Лысаковский указывает на то, что для выявления местных дефектов испытание высоким выпрямленным напряжением имеет ограниченную ценность. Я не думаю, чтобы сейчас можно было установить какие-либо количественные зависимости по этому вопросу. Однако, едва ли Г. И. Лысаковский прав, утверждая, что выявление местных дефектов производится одинаково и при

испытании постоянным и при испытании переменным напряжением. В этом вопросе меня поддерживают и М. И. Рапопорт и М. В. Хомяков, считающие, что испытание постоянным напряжением лучше выявляет местные дефекты.

2) Г. И. Лысаковский считает желательным повышение испытательного переменного напряжения до $(1,5 \div 1,75) U_n$. В этом я с ним согласен. Однако, обоснование этого повышения данными о средней электрической прочности изоляции электрических машин неубедительно. Испытания электрической прочности изоляции машин по казывают, что даже обмотки новых машин дают очень большой разброс пробивных напряжений. Ориентироваться на средние величины электрической прочности нельзя. Надо учитывать разброс и считаться с минимальными значениями электрической прочности. Последние могут быть много ниже средних. Еще более это справедливо в отношении машин, поработавших в эксплуатации, что видно из статьи Г. И. Лысаковского, опубликованной в журнале «Электрические станции» (№ 11, 1946 г., стр. 41 и табл. 2).

Заканчивая свой ответ на выступления участников дискуссии, я позволю себе выразить надежду, что моя статья и проведенная по ней дискуссия будут способствовать улучшению работы по профилактике изоляции электрических машин. Я хочу еще раз подчеркнуть большую важность этого вопроса не только для работы электрических станций МЭС и других министерств, но также для работ электродвигателей всех наших заводов и других промышленных предприятий.

* Опубликование статьи задержалось в связи с рассмотрением ее редакцией, рецензентами и участниками дискуссии, а также в связи с произведенной автором некоторой переработкой статьи. Редакция.

ОТ РЕДАКЦИИ

Вопросы, затронутые в статье А. М. Залесского „Профилактические испытания изоляции электрических машин“, вызвали большое количество откликов и широкую дискуссию. В дискуссии были отмечены отдельные спорные и недостаточно обоснованные положения статьи А. М. Залесского, однако статья вполне своевременно и правильно обратила внимание на актуальность вопросов профилактического испытания изоляции электрических машин, представляющих важное значение для электростанций и для электромоторного хозяйства всех отраслей промышленности СССР.



Современные приборы для измерения слабых магнитных полей

За время второй войны были разработаны и широко применялись простые в обращении приборы для обнаружения и измерения неоднородностей земного магнитного поля, составляющих небольшую часть от основного однородного поля. Такие магнитометры оказались нужными в частности, для контроля магнитного состояния кораблей при размагничивании их в целях защиты от магнитных мин [Л. 1]. Для этой цели требовались приборы, пригодные для измерений под водой и позволяющие измерять местные неоднородности магнитного поля, соответствующие изменению магнитной индукции в воздухе на $(0,5 \div 10) \mu \text{Wb/m}^2$ ($5 \div 100 \text{mGs}$) часто с погрешностью, не превосходящей 10^{-7}Wb/m^2 [Л. 2]. По отношению к магнитной индукции земного магнитного поля (около $50 \mu \text{Wb/m}^2$) это соответствует всего 0,2%.

Еще более чувствительные магнитометры понадобились для обнаружения и выслеживания с самолета подводных лодок, находящихся в погруженном положении. Применявшиеся для этой цели приборы позволяли обнаруживать неоднородности поля, составляющие около $\frac{1}{20000}$ от земного поля (т. е. порядка $2 \cdot 10^{-9} \text{Wb/m}^2$) [Л. 3]. Подобные приборы применялись также для миноискателей, в авиационных дистанционных компасах, в автопилотах.

В мирных условиях они находят применение для геологической разведки, где их использование сильно ускоряет работу. Магнитная съемка с самолета для целей геологической разведки была впервые применена в Советском Союзе А. А. Логачевым, разработавшим для этой цели индукционный магнитометр и проводившим еще до войны ряд успешных магнитных съемок с самолета [Л. 4]. В настоящее время этот метод получает распространение и в других странах [Л. 5, 5а]. В Советском Союзе высокочувствительный магнитометр был разработан лауреатом Сталинской премии П. А. Халилеевым.

Большинство разработанных для указанных целей приборов использует нелинейные магнитные характеристики железоникелевых сплавов типа пермаллой. Простейший по идее метод использования нелинейности магнитных характеристик для измерения индукции внешнего поля применен в американских авиационных магнитометрах [Л. 6]. Воспринимающий элемент такого магнитометра состоит из одной катушки 3 с прямолинейным сердечником 4 из железоникелевого сплава (рис. 1). Обмотка 3 питается синусоидальным переменным током от источника, обладающего большим внутренним сопротивлением для высших гармоник. Амплитуда тока в этой обмотке выбирается достаточно большой для того, чтобы доводить материал сердечника до насыщения. При отсутствии внешнего магнитного поля напряжение на зажимах обмотки 3 содержит кроме составляющей основной частоты только нечетные высшие гармонические составляющие. Внешнее магнитное поле, направленное параллельно оси сердечника, нарушает симметрию его магнитной характеристики по отношению к напряженности поля, создаваемой током в обмотке, следствием чего является появление четных гармонических составляющих в напряжении на зажимах обмотки. При этом вторая гармоническая составляющая напряжения оказывается в достаточно широком диапазоне пропорциональной магнитной индукции внешнего магнитного поля. Выделяя из напряжения на зажимах обмотки воспринимающего элемента эту составляющую (с помощью полосового фильтра 6) и, подвергая ее затем уси-

лению и детектированию, удастся получить на выходе ток, являющийся однозначной функцией составляющей магнитной индукции внешнего поля, параллельной оси воспринимающего элемента. Небольшие изменения ориентировки оси воспринимающего элемента, неизбежные в полете, могут вызывать изменения показаний прибора даже при совершенно однородном поле. Для уменьшения этих ложных сигналов ось воспринимающего элемента все время поддерживается параллельной направлению вектора магнитной индукции. Это достигается с помощью двух вспомогательных магнитометров, воспринимающие элементы которых располагаются перпендикулярно воспринимающему элементу основного магнитометра и друг другу. Три воспринимающих элемента, жестко связанные друг с другом, укрепляются в кардановом подвесе. Поворот подвижной части с воспринимающими элементами магнитометров вокруг осей карданового подвеса производится двумя сервомоторами, управляемыми каждый током на выходе одного из вспомогательных магнитометров. В усилителях вспомогательных магнитометров применено фазочувствительное линейное детектирование, так что направление тока в цепи сервомотора меняет знак, если меняется знак проекции вектора индукции внешнего магнитного поля на направление оси соответствующего вспомогательного магнитометра.

Для того чтобы оставшиеся изменения ориентировки подвижной части не могли вызвать изменений составляющей индукции измеряемого поля в направлении оси воспринимающего элемента основного магнитометра более, чем на $\frac{1}{100000}$ от общей величины магнитной индукции, отклонения оси воспринимающего элемента от направления вектора магнитной индукции должны быть менее 0,25°.

Однако, в дальнейшем было признано целесообразным снизить точность ориентировки воспринимающего элемента магнитометра до 1°. Вызванная этим погрешность компенсируется подведением к измерительному прибору, регистрирующему изменения измеряемого поля, сумм напряжений от всех трех магнитометров. При получении этих напряжений применяется квадратичное детектирование, так что напряжение, подводимое к прибору, пропорционально сумме квадратов составляющих магнитной

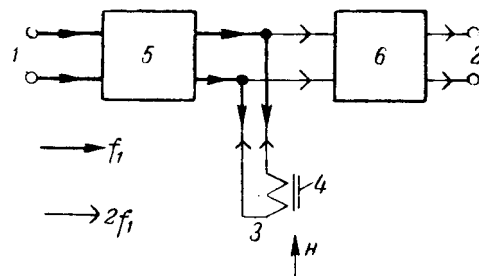


Рис. 1. Принципиальная схема магнитометра с одной катушкой.

1 — от источника переменного напряжения частоты f_1 ; 2 — к усилителю и измерительному прибору; 3 — обмотка воспринимающего элемента; 4 — прямой сердечник из пермаллой; 5 — полосовый фильтр, пропускающий частоты, близкие к f_1 ; 6 — полосовой фильтр, пропускающий частоты, близкие к $f_2=2f_1$; H — направление измеряемого внешнего поля.

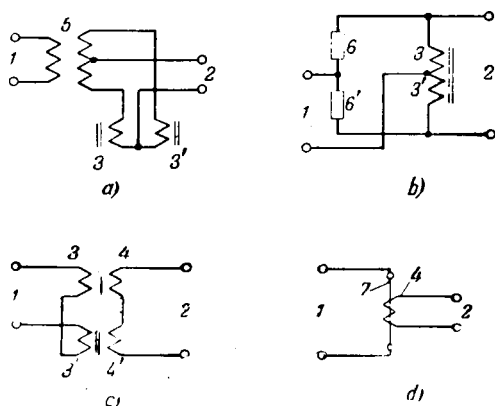


Рис. 2. Принципиальные схемы для выделения напряжения удвоенной частоты без фильтров.

1 — от источника переменного напряжения частоты f_1 ; 2 — напряжение частоты $f_2 = 2f_1$; 3 — к усилителю и измерительному прибору; 3', 3'' — обмотки воспринимающих элементов; 4, 4' — вторичные обмотки воспринимающих элементов; 5 — трансформатор; 6, 6' — сопротивления; 7 — прямолинейный отрезок проволоки из пермаллоя.

индукции по направлениям осей воспринимающих элементов, не зависящей от ориентировки последних.

В приборах для обнаружения подводных лодок регистрирующий прибор включен через фильтр и обнаруживает только сравнительно кратковременные изменения измеряемой магнитной индукции внешнего поля. Чувствительность прибора может регулироваться так, что отклонению указателя на всю шкалу может соответствовать изменение магнитной индукции внешнего поля в пределах от $10 \cdot 10^{-9}$ до $200 \cdot 10^{-9} \text{ Wb m}^{-2}$. В приборах для геологической разведки основное поле земли компенсируется полем, создаваемым постоянным током, текущим по обмотке воспринимающего элемента основного магнитометра. Это позволяет регистрировать с помощью магнитометра также обширные магнитные аномалии. Отклонение магнитной индукции внешнего поля от первоначального значения на $50 \cdot 10^{-9} \text{ Wb m}^{-2}$ вызывает отклонение стрелки на всю шкалу.

В другой схеме авиационного магнитометра [Л. 7, 13] в качестве воспринимающего элемента вспомогательного магнитометра применяются две одинаковые катушки 3 и 3' (рис. 2, а) с сердечниками из материала типа пермаллоя, соединенные последовательно и расположенные параллельно друг другу так, что направления полей, создаваемых током в обмотке, взаимно противоположны. Составляющая внешнего магнитного поля, параллельная осям сердечников, вызывает появление напряжения двойной частоты между точкой соединения катушек и средней точкой вторичной обмотки трансформатора 5, питающего цепь катушек. При отсутствии внешнего магнитного поля напряжение между этими точками при полной симметрии схемы равно нулю. Это позволяет обходиться без фильтров, но увеличивает число соединительных проводов между воспринимающими элементами и остальными частями магнитометра.

Для сохранения правильной ориентировки воспринимающих элементов магнитометра, даже при резких маневрах самолета, в этом магнитометре применен гироскопический стабилизатор, представляющий собой видоизмененный авиагоризонт Сперри. Ось вращения гироскопа устанавливается параллельно вектору магнитной индукции внешнего магнитного поля под влиянием корректирующих заслонок, управляемых токами, получаемыми на выходе усилителей вспомогательных магнитометров.

Мостиковая схема включения двух одинаковых обмоток была также использована в Англии для более грубого магнитометра, применявшегося для измерения магнитного поля под водой при контроле защитного размагничивания кораблей [Л. 2]. Основное отличие этой (рис. 2, б) схемы от предыдущей состояло в ином способе присоединения источника переменного напряжения 1: к общей точке двух измерительных катушек 3 и 3' и к общей точке сопротивлений 6 и 6'. Катушки 3 и 3' расположены на общем сердечнике так, что токи, протекающие по ним под влиянием приложенного напряжения, намаг-

ничивают его половины в противоположных направлениях. Напряжение, обусловленное магнитной несимметрией, вызванной измеряемым полем, снимается с несоединенных друг с другом концов обмоток воспринимающего элемента. Магнитометр используется только в качестве нулевого прибора в компенсационном методе измерения, при котором измеряемая составляющая внешнего поля компенсируется полем тока, протекающего по особой обмотке, окружающей воспринимающий элемент магнитометра¹. Применение компенсационного метода и сравнительно невысокие требования к точности измерения (допустимая погрешность около $10^{-7} \text{ Wb m}^{-2}$) позволили сильно упростить электрическую схему прибора в целом и применить для питания вместо переменного тока пульсирующий постоянный, а в качестве индикатора равновесия — магнитоэлектрический гальванометр, включенный без промежуточного усилителя на обмотки воспринимающего элемента через синхронный выпрямитель.

Тот же воспринимающий элемент был применен в переносном магнитометре. При этом электрическая схема была еще более упрощена. Источник периодического пульсирующего тока был заменен источником постоянного тока, включаемым и выключаемым вручную, а в качестве индикатора равновесия применялся обычный гальванометр, присоединенный наглухо к концам обмотки.

Питание обмотки возбуждения импульсами одной полярности и размещение обмоток 3 и 3' на двух половинах прямолинейного сердечника были применены также и в главном магнитометре одного из авиационных магнитометров [Л. 13]. Вместо мостовой схемы здесь была применена схема соединения обмоток, показанная на рис. 2, с. При таком соединении импульсы тока в обмотках 3 и 3' вызывают появление соответствующих импульсов напряжения на выходных зажимах 2 обмоток 4, 4' только при наличии постоянной составляющей внешнего поля вдоль сердечника. Знак и амплитуда этих импульсов, напряжения зависят от направления и напряженности внешнего поля. Амплитуда импульсов измеряется электронно-ламповым амплитудным вольтметром. Магнитометр по такой схеме оказался пригодным для обнаружения изменений поля порядка $0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Wb m}^{-2}$.

Схема рис. 2, с была применена также для выделения напряжения двойной частоты при питании обмоток 3 двух трансформаторов с прямолинейными разомкнутыми сердечниками переменным током [Л. 8]. При таком включении тоже удавалось обнаруживать изменения индукции внешнего поля до $10^{-9} \text{ Wb m}^{-2}$.

Следует указать на интересный способ выделения напряжения двойной частоты, использующий явление, возникающее при взаимодействии двух взаимно перпендикулярных полей, открытое сотрудниками ГФТИ [Л. 9]. Воспринимающим элементом магнитометра [Л. 10] служит прямолинейный отрезок проволоки из пермаллоя 7, по которому пропускается переменный ток (рис. 2, д). Этот ток создает в теле проволоки циркулярное переменное магнитное поле, вызывающее периодическое (с двойной частотой) изменение магнитной проницаемости проволоки в продольном направлении. Если этот отрезок проволоки поместить в измеряемое поле, то в окружающей его измерительной катушке 4 будет наводиться э. д. с. двойной частоты, пропорциональная составляющей напряженности измеряемого магнитного поля (или составляющей магнитной индукции), направленной вдоль оси отрезка. Более подробные данные об этом приборе можно найти в статье И. Л. Берштейна [Л. 10].

Были построены также магнитометры, использующие влияние продольного поля на активное сопротивление проволоки из пермаллоя, обтекаемой переменным током. Это явление тоже представляет результат взаимодействия двух взаимно перпендикулярных магнитных полей и объясняется, как было показано Г. С. Гореликом [Л. 9], двумя причинами: изменением распределения тока по сечению проволоки из-за изменения магнитной проницаемости для циркулярного магнитного поля под действием внешнего поля и обусловленным наличием внешнего поля уменьшением потерь на гистерезис. Простейший магнитометр такого типа представляет собой питаемый переменным током мост Уитстона, в одно из плеч которого включается прямолинейный отрезок проволоки

¹ Электричество, № 2, стр. 81, 1948.

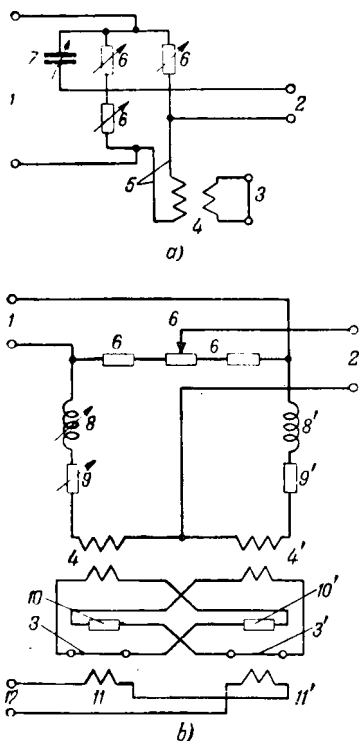


Рис. 3. Принципиальные схемы магнитометров, основанных на изменении активного сопротивления проволоки из ферромагнитного материала под влиянием продольного магнитного поля.

а — простой магнитометр для подводных измерений; *б* — дифференциальный магнитометр высокой чувствительности. 1 — от источника переменного напряжения; 2 — к усилителю и измерительному прибору или индикатору равновесия; 3 — воспринимающий элемент; 4 — переходный трансформатор; 5 — соединительные кабели; 6 — активные сопротивления в плечах моста; 7 — конденсатор для уравнивания реактивной составляющей 3 и 4; 8, 8' — индуктивности для балансировки схемы; 9, 9' — балансирующие сопротивления; 10, 10' — термометры сопротивления для компенсации температурных влияний; 11, 11' — обмотки, создающие вспомогательное магнитное поле; 12 — к источнику переключаемого постоянного напряжения.

из пермаллоя, служащий воспринимающим элементом магнитометра. В магнитометрах для подводных измерений с целью уменьшения влияния сопротивления соединительных проводов 5 (рис. 3, *а*) воспринимающий элемент 3 включался в схему через переходный трансформатор 4 с большим коэффициентом трансформации, помещаемый также под водой в непосредственной близости от воспринимающего элемента [Л. 2]. В отличие от предшествующих типов такой магнитометр непригоден в качестве нулевого прибора при компенсационном методе, так как чувствительность его при малых значениях продольной составляющей магнитной индукции очень низка. Наилучшая чувствительность к изменениям внешнего поля имеет место при определенном значении индукции, лежащем в пределах $(10 \div 70) \cdot 10^{-6} \text{ Wb m}^2$ (в зависимости от размеров проволоки) [Л. 11]. Поэтому обычно мост уравнивается, когда на воспринимающий элемент магнитометра действует магнитное поле земли, принимаемое за условный нулевой уровень. Всякое отклонение внешнего поля от первоначального значения может быть после этого обнаружено по нарушению равновесия моста и измерено по величине тока, который нужно пропускать по окружающей воспринимающий элемент компенсационной обмотке, чтобы снова привести мост в равновесие. Магнитометры этого типа оказались менее точными, чем применявшиеся для тех же подводных измерений магнитометры с катушкой, снабженной сердечником из пермаллоя [Л. 2].

Однако, этот же принцип был положен в основу чувствительного регистрирующего магнитометра, применявшегося для регистрации составляющей изменений магнитного поля земли, перпендикулярной магнитному меридиану (которую можно считать пропорциональной изменению магнитного склонения [Л. 12]). Для достижения высокой точности измерений было применено дифференциальное включение двух воспринимающих элементов (рис. 3, *б*). Один из них помещен в поле, представляющее собой сумму измеряемого и вспомогательного постоянного поля, а другой — в поле, представляющее собой разность тех же полей. Помимо этого предусмотрена компенсация температурных изменений сопротивления воспринимающих элементов с помощью термометров сопротивления 10 и 10' и приняты меры для предотвращения погрешностей, вызванных неравномерным распределением температуры и механическими напряжениями и деформациями проволоки. Питание моста производится переменным напряжением частотой 1 kHz, получаемым от стабилизированного лампо-

вого генератора. Напряжение на выходе моста 2 фильтруется, усиливается трехкаскадным усилителем на сопротивлении и детектируется с помощью фазочувствительного детектора (по схеме кольцевого модулятора), после которого следует один каскад усиления мощности с нагрузкой в катодной цепи. Схема тщательно балансируется так, чтобы равновесие моста не нарушалось при небольших изменениях питающего напряжения, температуры и тока в обмотках 11 и 11', создающих вспомогательное постоянное магнитное поле. Влияние на результаты измерения незначительной остающейся несимметрии, а также несимметрии, возникающей при неодинаковом изменении параметров отдельных элементов схемы во время работы, исключается путем периодического изменения направления тока, создающего вспомогательное поле, и измерения алгебраической разности напряжений, получающихся на выходе детектора при противоположных направлениях вспомогательного поля.

Помимо приборов, основанных на использовании магнитных характеристик железоникелевых сплавов, разрабатывались и применялись также приборы, основанные на индукционном принципе действия. Среди них интересен переносный магнитометр, применявшийся для исследования магнитных полей кораблей [Л. 2]. Основной частью его является неподвижная катушка, надета на трубку из немагнитного материала, внутри которой может перемещаться сердечник из ферромагнитного материала с малой коэрцитивной силой.

Импульс э. д. с. наводимой в катушке при выталкивании из нее сердечника, приближенно пропорционален напряженности внешнего поля. Выталкивание сердечника из катушки при подводных измерениях производилось воздухом, подаваемым сверху по резиновому шлангу.

Литература

1. H. W. K. Kelly. Historical Introduction to Degaussing, Covering Pre-War Work and Development up to the start of the Campaign against the German Mine. JIEE, т. 93, ч. I, № 70, 1946.
2. D. H. Parnam. Underwater Measurements of Magnetic Field, т. 93 ч. I, № 70, стр. 435, 1946.
3. Airborne Metal Seeker. Radio-Craft, т. 18, № 11 стр. 73, 1947.
4. А. А. Логачев. Воздушная магнитная съемка и опыт ее применения в геологопоисковых работах. Госгеол. издат. 1947.
5. I. R. Balsley. Airborne Magnetometer. Petroleum Engineer, т. 17, № 11, стр. 77; № 12, стр. 104, 1946.
- 5а. W. W. Burns. Airborne Magnetometer Surveys of Bahamas Soon to Start. The Oil and Gas Journal, т. 45, № 51, стр. 92, 1947.
6. E. P. Felch, W. J. Means, T. Slonczewski, L. G. Parratt, L. G. Rumbaugh, A. J. Tickner. Air-Borne Magnetometers, Fl. Eng., т. 66, № 7, стр. 680, 1947.
7. Airborne Magnetic Detector. Product Engineering, т. 18, № 8, стр. 134, 1947.
8. L. D. Armstrong. The Use of High Permeability Materials in Magnetometers. The Application of a Saturated Core Type Magnetometer to an Automatic Steering Control. Canadian Journal of Research, А, т. 25, № 3, стр. 124, 1947.
9. Г. С. Горелик. О нелинейных явлениях, происходящих при суперпозиции перпендикулярных магнитных полей. Изв. АН СССР, серия физическая, т. 8, № 4, стр. 172, 1944.
10. И. Л. Берштейн. Об одном новом типе магнетометра. Изв. АН СССР, серия физическая, т. 8, № 4, стр. 189, 1944.
11. E. P. Harrison, G. L. Turney, H. Rowe, H. Gollup. The Electrical Properties of High Permeability Wires Carrying Alternating Current. Proceeding of the Royal Society, T. 157, № 891, стр. 451, 1936.
12. A. Butterworth. A Sensitive Recording Magnetometer, JIEE, т. 94, ч. II, № 40. стр. 325, 1947.
13. V. Vacquier, P. F. Simons, A. W. Hull. A Magnetic Airborne Detector Employing Magnetically Controlled Gyroscope Stabilization. Rev. of Scientific Instruments, т. 18, № 7, стр. 483, 1947.

Кандидат техн. наук Б. И. ФИЛИПОВИЧ

О проведении юбилея Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина)

В связи с исполняющимся в июне 1948 г. 50-летием со дня основания Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина) Совет Министров Союза ССР вынес постановление, в котором Министерству высшего образования СССР разрешено провести в июне 1948 г. юбилей ЛЭТИ. В ознаменование юбилея будет проведена научно-техническая конференция, посвященная итогам деятельности Института за 50 лет. Намечено издание трудов Института.

Лаборатории радиотехники ЛЭТИ постановлением правительства присвоено имя изобретателя радио проф. А. С. Попова. В Институте будет организован музей проф. А. С. Попова. Приказом Министра высшего образования открытие музея приурочено к началу юбилейных торжеств.

Для проведения юбилея ЛЭТИ Министерством организована юбилейная комиссия в составе: академика Г. О. Графтио (председатель), П. И. Скотникова, М. А. Бабилова, С. А. Ринкевича и С. Я. Соколова.



В НТО Московского энергетического института им. Молотова

В научно-техническом обществе (НТО) МЭИ состоялся ряд докладов и конференций.

На конференции, посвященной 30-летию Великой Октябрьской социалистической революции, с докладом «Развитие электропромышленности за 30 лет» выступил заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. Г. Н. Петров. Затем были сделаны доклады: «Развитие электрических станций и сетей за 30 лет» (проф. П. Г. Грудинский), «Развитие радиотехники за 30 лет» (кандидат техн. наук В. К. Викторский), «Развитие тепло-техники за 30 лет» (член-корр. АН СССР М. А. Стырикович) и «Развитие гидроэнергетики за 30 лет» (доктор техн. наук, проф. Т. Л. Золотарев).

Одно из общих собраний членов НТО МЭИ было посвящено вопросам постановки физико-математического образования в энергетическом вузе. Собрание заслушало доклады доктора физико-матем. наук, проф. В. А. Фабриканта «Физика в энергетическом вузе» и доктора физико-матем. наук, проф. В. И. Левина «Математика в энергетическом вузе». На этом же собрании выступила с докладом «Работа МЭИ в 1948 г. и задачи НТО» директор МЭИ инж. В. А. Голубцова, подчеркнувшая роль научно-технической общественности в решении задач перестройки и совершенствования методов преподавания.

В электротехническом отделении Общества и его секциях были заслушаны доклады: доктора техн. наук, проф. С. М. Брагина «Распределение напряжения в слое диэлектрика» и кандидата техн. наук, доц. В. А. Веникова «Применение методов теории подобия и моделирования в электротехнике».

В секции электрических систем инж. А. Я. Либерман (ЦНИЭЛ МЭС) прочел доклад «Вибрация проводов воздушных линий».

Доктор техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич в докладе на тему «Вопросы отключения электрических цепей высокого напряжения» остановился на общих условиях гашения дуги в выключателях и на вопросах, связанных с нарастанием электрической прочности дугового промежутка и восстановлением напряжения.

Кандидат техн. наук В. М. Блок прочитал доклад на тему «Методика расчета токов коротких замыканий в замкнутых электрических сетях».

Вопрос о блочных передачах электроэнергии и современном практическом их применении был освещен в докладе доц. Н. Н. Крачковского «Блочные передачи».

В секции теоретической электротехники был заслушан доклад доктора техн. наук, проф. К. М. Поливанова «Роль русских ученых в развитии теории ферромагнетизма». Говоря о вкладе русских ученых в науку о магнетизме, докладчик отметил, что проф. В. К. Аркадьев впервые ввел понятие о комплексной проницаемости, а проф. Н. С. Акулов — понятие тензора магнитоstriction.

В докладе доктора физико-матем. наук, проф. С. Э. Хайкина «Роль русских ученых в развитии учения о колебаниях» была охарактеризована выдающаяся деятельность академиков Лебедева, Ляпунова, Крылова и др. Докладчик остановился на огромном значении работ советских ученых в развитии теории колебаний, подчеркнув роль группы ученых, возглавлявшейся академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси.

Кандидат техн. наук Н. Г. Сушкин в докладе «Электронный микроскоп» дал исторический обзор развития электронных микроскопов и осветил принцип действия современных электронных микроскопов. Докладчик отметил, что советские электронные микроскопы являются лучшими из всех существующих типов.

В секции промышленной электротехники в докладе доктора техн. наук, проф. Ю. С. Чечета «Итоги работы МЭИ по исследованию микродвигателей и задачи построения единой серии малых машин в СССР» были отражены результаты большой комплексной работы, проводившейся на кафедре электрических машин.

Доклад на тему «Электропривод мощных вентиляторных установок» сделал доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов.

Доктор техн. наук А. Г. Иосифьян прочел доклад на тему «Линейные преобразования дифференциальных уравнений синхронной машины».

Результаты одной из исследовательских работ, проводимой в МЭИ и ВЭИ, были изложены в докладе «Осциллографирование кривых момента вращения асинхронной машины», сделанном кандидатом техн. наук Е. М. Синельниковым (ВЭИ).

В светотехнической секции НТО МЭИ, работавшей совместно с МОНИТОЭ, была проведена большая работа по рассмотрению и обсуждению проекта новых норм искусственного освещения. Доклад по этому вопросу сделал кандидат техн. наук Б. И. Луговской (ЦИПС).

Исторической теме «Возникновение и развитие освещения Москвы» был посвящен доклад инж. С. И. Смирнова (Мосгорсвет).

Инж. М. Г. Лурье (Центроэлектромонтаж) сделал доклад о применении люминесцентных ламп для освещения станции метро «Кировская».

Доклад на тему «Жизнь и деятельность В. Н. Чикова» (к 50-летию со дня смерти) прочитал кандидат техн. наук И. Д. Артамонов (Военно-инженерная академия).



Конференция МОНИТОЭ

В феврале 1948 г. состоялась отчетно-выборная конференция членов Московского отделения Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетиков (МОНИТОЭ). В работе конференции приняли участие 235 делегатов и большое количество гостей.

С отчетным докладом о деятельности Московского отделения общества за 1946 и 1947 гг. выступил председатель правления МОНИТОЭ проф. Б. А. Телешев. За отчетный период деятельность МОНИТОЭ развивалась в соответствии с задачами научных инженерно-технических обществ. В основном эти задачи сводятся к установлению постоянной и действенной связи между наукой и техникой, к широкому общественно-техническому обсуждению ведущих проблем энергетики послевоенной сталинской пятилетки, к повышению идейно-политического уровня членов общества и к расширению их научно-технического кругозора.

За истекшие два года в МОНИТОЭ было организовано 6 новых научных секций: секции местной энергетики, светотехники, паротурбинных установок, электромашиностроения, и, кроме того, гелиогруппа и комитет научно-технической пропаганды. Таким образом, общее количество научных секций доведено до 16. Число членов МОНИТОЭ возросло за отчетный период с 854 до 1 675 чел. Возросло также с 30 до 42 число юридических членов отделения. Ведущей формой массовой работы общества были научно-технические сессии и совещания. За 1946—1947 гг. было проведено 16 сессий и совещаний. В них, как правило, принимали участие заинтересованные министерства, научно-исследовательские институты, вузы и др. организации. Наиболее успешно в 1947 г. были проведены следующие научно-технические сессии: Всесоюзная сессия по светотехнике; научно-техническая сессия, посвященная вопросам водоподготовки и водного режима промышленных котельных; Всесоюзное совещание по техническим проблемам теплофикации.

Другим мероприятием, предусматривающим расширение научно-технического кругозора и углубление знаний членов общества по своей специальности, является проведение докладов, лекций и дискуссий. Число прослушанных докладов возрастало ежегодно: в 1945 г.—110, в 1946 г.—252 и в 1947 г.—467 докладов. Тематика докладов была связана с насущными вопросами отечественной энергетики.

В отчетный период продолжала развиваться и работа отделения в учреждениях и предприятиях. К числу передовых низовых организаций МОНИТОЭ следует отнести организации: при Управлении канала им. Москвы (председатель инж. А. М. Румянцев), при автозаводе им. Сталина (председатель инж. Т. А. Титов), при заводе «Серп и Молот» (председатель инж. М. И. Минская).

Значительное развитие получила литературно-издательская деятельность МОНИТОЭ. В 1947 г. изданы труды

Кандидат техн. наук Б. Л. Балашинский (МЭЛЗ) прочитал доклад «Электрические лампы накаливания с двумя и более спиралями».

Доклад «Светотехника цветного кино» сделал кандидат техн. наук Г. А. Голостенев (НИКФИ).

Инж. В. В. Дыбовский сделал доклад на тему «Неослепляющие блескости в установках архитектурного освещения».

Научно-техническое общество МЭИ провело выборы правления. В новое правление избраны: доктор техн. наук, проф. А. Я. Буйлов (председатель), кандидат техн. наук В. А. Веников (зам. председателя) и кандидат техн. наук А. М. Сенкевич (ученый секретарь).

Кандидат техн. наук, доц. В. А. ВЕНИКОВ

различных сессий и совещаний МОНИТОЭ, общим объемом около 140 печатных листов.

Содоклад сделал председатель ревизионной комиссии МОНИТОЭ инж. В. П. Репкин.

В прениях по отчетным докладом выступили А. А. Глебович, А. Б. Крикунчик, С. М. Лившиц, П. И. Воеводин, Е. Л. Лисанский, М. И. Минская, В. Б. Пакшвер, С. Ф. Иванов, А. А. Тайц, М. И. Цейтлин, П. И. Кондратин, А. К. Шадрин, А. Ф. Румянцев, Л. А. Рихтер, Б. В. Петухов, С. И. Лезнов, Н. И. Жирнов, Л. С. Кусков, А. С. Горшков.

Конференция приняла решение, в котором работа МОНИТОЭ за 1946 и 1947 гг. признана хорошей.

В результате тайного голосования конференцией были избраны в члены правления МОНИТОЭ: Б. А. Телешев, М. В. Лебедев, Б. К. Александров, П. И. Воеводин, А. М. Румянцев, А. К. Шадрин, С. В. Татищев, П. И. Василенко, А. А. Тайц, Ю. В. Корицкий, С. В. Алексеев, Г. Н. Петров, М. Б. Перлин, А. С. Горшков, Л. Д. Белькинд, С. Ц. Фаерман, А. Д. Свенчанский, И. И. Гурвич, М. С. Шкроб, Ю. А. Якуб, И. А. Сыромятников. Кандидатами в члены правления избраны: Д. Г. Чижов, П. С. Гольденберг, Т. А. Титов, Д. А. Никитин и А. И. Мальц. Ревизионная комиссия избрана в составе: В. П. Репкина, В. С. Квашнина, В. А. Куценова, В. К. Дюскина и А. А. Глебовича.

Конференция заслушала доклад Заслуженного деятеля науки и техники, проф. Л. Д. Белькинда «Русские электротехники».

С докладом «Задачи новой техники в области энергетики» выступил проф. Б. А. Телешев. Этот доклад был построен на материалах сборника, в составлении которого приняли участие все секции МОНИТОЭ.

Конференция приняла резолюцию—наказ новому составу правления МОНИТОЭ.

Участники конференции с огромным воодушевлением приняли приветствие товарищу Сталину.

После окончания конференции состоялось первое заседание вновь избранного правления. Председателем правления МОНИТОЭ избран Б. А. Телешев. Заместителями председателя — А. С. Горшков и А. К. Шадрин. Членами президиума избраны — П. И. Воеводин, А. А. Тайц, Ю. А. Якуб, С. Ц. Фаерман и М. Б. Перлин. Руководителями секторов МОНИТОЭ утверждены: А. С. Горшков (сектор низовой работы), М. С. Шкроб (сектор повышения квалификации членов общества), Ю. А. Якуб (сектор научно-технических работ). Председателем Комитета научно-технической пропаганды утвержден П. И. Воеводин. Руководство издательской деятельностью МОНИТОЭ возложено на М. Б. Перлина.

Инж. А. О. МАГИДСОН



Фархадская гидроэлектростанция

В феврале 1948 г. сдана в эксплуатацию первая очередь мощной районной гидроэлектростанции на реке Сыр-Дарья в Узбекской ССР — Фархадской гЭС.

В состав головного узла станции входят водосливная плотина высотой 26 м, глухая земляная плотина и деривационный канал протяженностью до 14 км. Напорно-станционный узел состоит из напорного бассейна, четырех напорных трубопроводов, сбросного быстротока, здания гЭС и открытой подстанции 110 и 35 кВ с выводами высоковольтных линий электропередачи.

При сооружении Фархадской гЭС произведено до 14 млн. м³ земляных и скальных работ, уложено до 300 тыс. м³ бетона и смонтировано 3 500 т металлоконструкций. В народной стройке Фархадской гидроэлектростанции участвовали десятки тысяч колхозников.

Фархадская гЭС будет полуавтоматизированной станцией. Командным импульсом с пульта управления будут производиться пуск и останов агрегата, подъем и снижение

нагрузки. Каждый из генераторов может работать и в режиме активной мощности, и в режиме синхронного компенсатора, для чего предусмотрена система воздушной компрессии по отжатию воды из камеры рабочего колеса.

В настоящее время на Фархадской гЭС ведутся монтажные работы по второй очереди станции и строительство высоковольтных линий 110 и 35 кВ. Одновременно сооружается первая очередь мощного оросительного канала для подачи воды в южную часть Голодной степи. Головное сооружение этого оросительного канала размещено в напорном бассейне гЭС.

В результате сооружения Фархадской гЭС значительно усиливается энергетическая база Узбекской ССР и приближается окончательное разрешение важной проблемы обводнения ресурсами Сыр-Дарьи большой территории Голодной степи.

Инж. Ф. Л. ВЕЙТКОВ



О награждении завода „Электросила“ и работников завода

Указами Президиума Верховного Совета СССР от 15 апреля 1948 г. за образцовое выполнение заданий правительства в период Великой Отечественной войны, заслуги в деле обеспечения электрооборудованием энергетики и других ведущих отраслей народного хозяйства и в связи с 50-летием ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени завода «Электросила» имени С. М. Кирова Ми-

нистерства электропромышленности награждены: орденом Ленина завод «Электросила» и работники завода орденами и медалями. Среди награжденных: заместитель министра электропромышленности, бывш. гл. инженер завода Д. В. Ефремов, директор завода Г. Я. Мухин, гл. инженер Е. Г. Комар и др., всего 390 чел.



О награждении управления „Днепрострой“ и работников Днепростроя

За успешное восстановление и ввод в действие первой очереди Днепровской гидроэлектростанции имени В. И. Ленина, имеющей большое значение для обеспечения электроэнергией промышленности Приднепровья и Донбасса, указом Президиума Верховного Совета СССР от 27 апреля 1948 г. специальное строительно-монтажное управление «Днепрострой» Министерства электростанций награждено орденом Ленина.

Указом Президиума Верховного Совета СССР от 27 апреля 1948 г. за успешное выполнение задания прави-

тельства по восстановлению и пуску первой очереди Днепровской гидроэлектростанции им. В. И. Ленина награждены орденами и медалями рабочие, инженерно-технические работники и служащие, отличившиеся на восстановлении Днепровской гидроэлектростанции имени В. И. Ленина. Среди награжденных: министр электростанций Д. Г. Жимерин, начальник Днепростроя Ф. Г. Логинов, гл. инженер строительства И. И. Кандалов и др., всего 645 чел.



О награждении треста „Храмгэсстрой“ и работников Храмгэсстроя

За успешный ввод в эксплуатацию Храмской гидроэлектростанции, построенной в сложных условиях и имеющей большое значение для обеспечения электроэнергией промышленности Грузинской ССР, указом Президиума Верховного Совета СССР от 27 апреля 1948 г. трест «Храмгэсстрой» Министерства электростанций награжден орденом Ленина.

Указом Президиума Верховного Совета СССР от 27 апреля 1948 г. за успешное выполнение задания прави-

тельства по строительству в трудных условиях и вводу в действие первой очереди Храмской высоконапорной регулирующей гидроэлектростанции награждены орденами и медалями работники, отличившиеся на строительстве Храмской гидроэлектростанции Министерства электростанций. Среди награжденных: заместитель министра электростанций И. И. Дмитриев, главный инженер Главгидроэнергостроя А. А. Беляков, управляющий трестом «Храмгэсстрой» В. Л. Чанкотадзе и др., всего 312 чел.



Профессор В. К. Попов



12 марта с. г. на 53 году жизни скончался профессор, доктор технических наук Владимир Константинович Попов, имя которого тесно связано с созданием русской научной школы электропривода.

В. К. Попов окончил Ленинградский политехнический институт им. Калинина (1921 г.) и в нем же начал свою научную и преподавательскую работу.

Еще в 1926—1927 гг., руководя учебными работами в электромашинной лаборатории ЛПИ, В. К. Попов совместно с Л. М. Пиотровским выпустил учебное пособие «Испытание машин переменного тока» в двух частях, которое явилось первым печатным трудом в этой области в СССР и получило широкое распространение. До 1930 г. он работал на кафедре электрических машин, где обогатил свои знания в области теории и приобрел широкий опыт по экспериментальному исследованию электрических машин. Его внимание привлекли вопросы применения электрических машин для привода механизмов. В 1929 г. он ввел и стал читать на Электротехническом факультете (ЛПИ) курс «Применение электродвигателей в промышленности», который затем послужил основой дальнейшего развития теории электропривода. В 1930 г. им организуется лаборатория и кафедра «Электрооборудование промышленных предприятий», которыми он руководил до конца своей жизни. Большая эрудиция, энергичность, организаторский талант и огромная работоспособность В. К. Попова позволили ему быстро развернуть работу кафедры и лабораторию и впоследствии создать крупную научную школу по электроприводу. Руководимая им кафедра вела до 18 различных курсов на разных факультетах института и выпустила свыше 700 инженеров-электриков по специальности электрооборудование промышленных предприятий. Под его руководством подготовили и успешно защитили диссертации 15 аспирантов, преподавателей и научных работников (ЛПИ, МЭИ и др. институты). Владимир Константинович обладал замечательным свойством педагога—охотно делился своими обширными знаниями, чем всегда привлекал к себе молодежь, которая относилась к нему с любовью и уважением.

В. К. Попов отдал много сил и энергии делу подготовки офицерских кадров для инженерных войск Советской Армии. 13 лет он вел преподавание (электрические машины, электроавтоматика) в Военной электротехнической Академии им. Буденного сначала в качестве преподавателя, затем профессора и начальника кафедры.

Капитальным научным трудом В. К. Попова в области электропривода явился хорошо известный трехтомник «Применение электродвигателей в промышленности», объемом в 85 печатных листов. В нем суммированы научные работы автора по основным вопросам привода.

По мере развития автоматики и с распространением, несколько позднее, принципов непрерывного автоматического управления—следящего привода—В. К. Попов все больше вовлекается в круг этих проблем современного электропривода.

В институте автоматики и телемеханики АН СССР, где он руководит группой, а впоследствии лабораторией автоматизированного привода и отделом автоматического управления, им ставятся исследования и анализируются сложные системы автоматизированных приводов. Под его руководством проектируются мощные установки для металлургической промышленности. Этот период его научной деятельности находит отражение в ряде статей в журналах «Известия ОТН АН СССР», «Автоматика и телемеханика» и др. В. К. Попов пишет курсы: «Введение в электроавтоматику», «Основы построения схем автоматизированного электропривода», «Элементы электроавтоматики». В первых двух книгах впервые в русской литературе обобщены вопросы теории следящего привода и синхронной связи.

Внимание В. К. Попова привлекали также вопросы обобщения теории и построения научной классификации электропривода. Свои идеи в этой области он изложил в статьях «Обобщение классификации нагрузочных диаграмм электропривода» (Электричество, № 21, 1936) и «К обобщению теории движения автоматизированного электропривода» (Электричество, № 4, 1947).

Успешной научной и педагогической деятельности В. К. Попова помогала тесная связь его с промышленностью. При его участии разрабатывались проекты электрооборудования заводов Кузнецкого, Магнитогорского, Запорожстали, многих заводов Урала и Донбасса.

До последних дней своей жизни В. К. Попов был постоянно связан с заводом «Электросила», где при его участии разрабатывались сложные мощные системы автоматизированного электропривода с непрерывным управлением. Разработанные В. К. Поповым единые нормы по электрическим машинам утверждены IX Всесоюзным электротехническим съездом.

В период Великой Отечественной войны он принимал участие в работах по заданию штаба Северного фронта.

В тяжелой обстановке военного времени он создает «Основы электропривода» — фундаментальный учебник по электроприводу для электротехнических вузов. Скованный тяжелой болезнью, В. К. Попов заканчивает в 1947 г. монографию «Следящий привод с непрерывным управлением», в которой дает обобщение теории в этой весьма важной области техники.

Научная деятельность В. К. Попова тесно переплеталась с большой общественной работой. Начиная с 1935 г. он являлся председателем секции электропривода ВНИТОЭ, с 1946 г. — членом президиума правления ВНИТОЭ. По инициативе В. К. Попова и при личном его участии проводится ряд научно-технических конференций и совещаний, сыгравших большую роль в развитии техники электропривода.

В течение многих лет В. К. Попов являлся одним из активных и ближайших сотрудников и консультантов редакции журнала «Электричество». Владимир Константинович во многом способствовал успешному развитию журнала.

Крупный вклад в науку об электроприводе, многочисленные печатные труды, большая педагогическая работа и широкая инженерно-техническая и общественная деятельность характеризуют В. К. Попова как выдающегося научного деятеля и инженера.

Советская наука, высшая школа и промышленность понесли в лице В. К. Попова большую утрату. Воспитанные им научные и инженерные кадры, все кто с ним работал и общался, сохраняют о нем светлую память.

Министерство электропромышленности СССР.
Ленинградский политехнический институт им. Калинина.
Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР.
Всесоюзное научное инженерно-техническое общество энергетики.

Редакция журнала «Электричество».
Редакция журнала «Вестник электропромышленности».
Кафедра электропривода Московского энергетического института им. Молотова.

Об американской „помощи“ электрохозяйству Западной Европы

Еще до второй мировой войны в электроэнергетике капиталистических стран со всей остротой проявлялись черты загнивания, глубокая неравномерность развития, внутренние противоречия и трудности, свойственные капиталистическому хозяйству вообще и не позволявшие реализовать со всей полнотой прогрессивные достижения техники. В период войны положение электрохозяйства западноевропейских стран (Англия, Италия, Франция и др.) еще более ухудшилось. Определенный ущерб причинили электрохозяйству непосредственные разрушения, которым подверглись отдельные электростанции и электросети. На состоянии капиталистического электрохозяйства сильно сказываются падение угледобычи, изношенность необновляемого энергоаппарата, отсутствие нормальных ремонтов и т. п. Такое состояние электрохозяйства является прямым результатом хозяйничанья капиталистических монополий, плохо прикрытого маской фальшиво-социалистических мероприятий вроде «национализации», «планирования», «регулирования» и т. п.

В журнале *Electrical World* [Л. 1] приведены данные о программе «помощи» западно-европейскому электрохозяйству по «плану Маршалла». Эти данные показывают, вопреки намерениям редакции американского журнала, общую неэффективность намеченной «помощи» и ее специфическую направленность в сторону подчинения западноевропейской энергетики, как и всего хозяйства Западной Европы, капиталистическим монополиям США.

В докладе Министерства внутренних дел США, максимальные производственные возможности энергомашиностроительной промышленности США (по выпуску машин) оцениваются на ближайшие годы в 4,5 млн. kW в год, из которых лишь от 0,5 до 1 млн. kW могут быть выделены на экспорт. В действительности представитель Министерства внутренних дел США Круг считает реальным лишь достижение около 75% указанного объема выпуска продукции энергомашиностроения, т. е. немногим больше 3 млн. kW [Л. 2]. Следовательно, для экспорта вряд ли может быть выделено машин даже на мощность 0,5 млн. kW в год или 2 млн. kW за весь период «помощи» по «плану Маршалла».

Между тем, заявка 16 стран предполагает рост генераторной мощности за 4 года на 25 млн. kW [Л. 1]. Только по одной Англии потребный ввод новой генераторной мощности, согласно заявлению Министерства топлива и энергетики в палате общин в конце января 1948 г. составляет за 4 года 6 млн. kW. Однако низкие производственные возможности английского энергомашиностроения очевидны. Они явствуют из того, что за истекшие два года (1946 и 1947 гг.), несмотря на дефицит мощности по

системе «Грид» (порядка 2 млн. kW), введено всего 790 тыс. kW новой мощности электростанций [Л. 3]. Следует отметить, что указанный дефицит мощности, определяемый условиями покрытия максимума нагрузки, сочетается с значительным недоиспользованием, недогрузкой всего наличного энергоаппарата, что вообще характерно для капиталистического электрохозяйства.

Сопоставляя заявленную потребность ввода генераторной мощности по 16 странам с обещанным экспортом продукции из США, можно представить ничтожное значение этой «помощи» для электрохозяйства западноевропейских стран. Намеченные ассигнования США в электрохозяйство Западной Европы составят по предварительным данным всего 250 млн. долл.

Если исходить из минимальной стоимости сооружения электростанций и электросетей, то и в этом случае, при условии полного удовлетворения заявки, «помощь» США может составить лишь менее 4% потребных капиталовложений. А ведь США урезали и без того ограниченные заявки промышленной «помощи».

В то же время плата за эту мизерную долю ассигнований в электростроительство весьма значительна. США проявляют «трогательную заботу» о сбережении дефицитного европейского топлива, предлагая ограничить добычу и потребление угля в европейских странах, увеличить долю дизельных двигателей в Англии, перевести угольные котлы на нефть во Франции и т. д. Единственной страной, где будет одобрено развитие угольной промышленности, явится Западная Германия. Таким образом, будет увеличена зависимость энергетики западноевропейских стран от ввоза нефти, ресурсами которой, как известно, эти страны не располагают.

По мнению американцев, довоенное электрохозяйство Европы имело достаточную генераторную мощность и достаточные резервы. Поэтому предусматривается лишь восстановление генераторной мощности и расширение распределительных электрических сетей, но не магистральных линий электропередачи.

Американская техническая печать подчеркивает трудности вывоза значительного количества турбин, генераторов и электродвигателей для Западной Европы. В то же время выдвигается гораздо более легкое для осуществления предложение о посылке американских инженеров и строителей для консультации, т. е. по существу для установления контроля над западно-европейской энергетикой [Л. 4].

Само собой разумеется, что такая «программа» развития западноевропейского электрохозяйства лишь усиливает его бесплановость, раздробленность и отсталость (хрони-

ческая недогрузка энергоаппарата, наличие устаревших и нерациональных энергоустановок, множественность применяемых напряжений и т. д.).

Возня, поднятая вокруг американской «помощи», не имеет, конечно, ничего общего с разрешением назревших проблем серьезной реконструкции западноевропейского электрохозяйства, которая не под силу капитализму вообще.

Ярким контрастом, по сравнению с неприглядным состоянием капиталистического электрохозяйства Западной Европы, выделяются успехи, достигнутые Советским Союзом в области восстановления и развития электроэнергетики в послевоенной сталинской пятилетке и демонстрирующие огромные преимущества плановой социалистической системы народного хозяйства.

Плановые мероприятия в области электростроительства и реконструкции электрохозяйства в странах новой демократии также дали успешные результаты. Намечено

и разворачивается широкое гидроэнергостроительство в Болгарии и Югославии; в странах новой демократии выполняются планы выработки электроэнергии и т. д. Эти страны добились успехов не на основе пресловутой американской «помощи», связанной с потерей государственной независимости, а на путях коренных демократических преобразований и национализации крупной промышленности (в том числе и электрохозяйства), проведенной в интересах всего народа и при его активной революционной поддержке.

Литература

1. El. World, 27 сент., 44 стр., 1947.
2. El. World, 8 нояб., 81 стр., 1947.
3. Engineering, № 4279, V. 165, 111 стр., 1948.
4. Engineering News Record, V. 139, № 22, стр. 46, 1947.

Кандидат техн. наук **Б. Л. ЭРЛИХМАН**
и инж. **Я. А. КЛИМОВИЦКИЙ**



О советском приоритете в разработке и применении компаундирования синхронных генераторов

В журнале «Вестник электропромышленности», № 9 за 1947 г. в разделе «Из иностранной техники» помещена статья И. В. Тихомирова «Синхронные генераторы и автоматические регуляторы напряжения германских передвижных электростанций». В статье описаны компаундированные синхронные генераторы фирмы «A. Von Kaick» и фирмы «Loher».

Компаундирование синхронных генераторов посредством серьезных трансформаторов тока и твердых выпрямителей давно разработано и широко применяется в СССР. В журнале «Электричество» (№ 9, 1940 г.) была помещена статья Н. Богданова, предлагавшая компаундирование для генераторов малой мощности. В журнале «Электрические станции» (№ 21—22, 1941 г.) была помещена статья Л. В. Цукерника, предлагавшая компаундирование как средство повышения устойчивости для генераторов мощных энергосистем. В журнале «Вестник электропромыш-

ленности» (№ 9, 1943 г.) была помещена статья Л. В. Цукерника, излагавшая основы теории компаундированных синхронных машин.

В СССР насчитываются десятки электростанций, эксплуатирующих компаундированные генераторы. Поэтому казалось бы естественным снабдить статью, описывающую начавшееся за границей применение компаундирования, примечанием, отмечающим приоритет советской технической мысли в этом вопросе. В журнале «Вестник электропромышленности» не был указан приоритет советских инженеров в применении компаундирования синхронных генераторов, что является недопустимым.

Действительный член Академии наук
Украинской ССР **С. А. ЛЕБЕДЁВ**
Доктор техн. наук, проф. **П. С. ЖДАНОВ**
Кандидат техн. наук **Л. В. ЦУКЕРНИК**
Кандидат техн. наук **И. А. СЫРОМЯТНИКОВ**



Статья И. В. Тихомирова «Синхронные генераторы и автоматические регуляторы напряжения германских передвижных электростанций» была посвящена особенностям конструкций и схем германских синхронных генераторов малой мощности. Примененное в них компаундирование посредством твердых выпрямителей и серьезных трансформаторов излагается в статье отнюдь не как новинка, а лишь в связи с описанием генераторов, так как устройство это давно известно советскому читателю. Вопросы теории компаундирования, устойчивости и т. д. в статье не затрагиваются вовсе.

Следует отметить, что завод им. Калинина МЭП и другие отечественные заводы давно выпускают генераторы малой мощности с самовозбуждением от встроенных твер-

дых выпрямителей и с компаундированием посредством серьезных трансформаторов (системы С. Б. Юдицкого—ВЭИ). Опытная партия этих машин была выпущена еще в 1941 г. Таким образом, приоритет и ведущая роль отечественной электропромышленности в этой области могут считаться общезвестными.

По изложенным соображениям редакция журнала «Вестник электропромышленности» не видела необходимости сопровождать статью И. В. Тихомирова особым примечанием.

Редактор журнала
«Вестник электропромышленности»

Д. В. ЕФРЕМОВ



Присуждение золотой медали имени А. С. Попова

К 50-летию изобретения радио в мае 1945 г. была учреждена золотая медаль имени А. С. Попова, великого русского физика, изобретателя радио. Медаль присуждается Президиумом Академии наук СССР ко «Дню радио» за выдающиеся научные работы в области радио как советским, так и зарубежным ученым.

В этом году медаль присуждена члену-корреспонденту Академии наук В. П. Вологдину за совокупность его научных работ по радиотехнике. Исследования В. П. Вологодина в области генерации высоких частот, индукционной закалки стали, ртутных выпрямителей сыграли большую роль в развитии советской электротехники.



Экономия электроэнергии в промышленности

ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Под редакцией члена-корр. АН СССР В. И. Вейца. Государственная инспекция по промэнергетике и энергонадзору при Министерстве электростанций СССР и Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР. Госэнергоиздат, 1947, 208 стр., тираж 6 000 экз., цена 12 руб.

Среди существующих работ по вопросам экономии электроэнергии недавно вышедшая книга «Экономия электроэнергии в промышленности» отличается тем, что в ней поставлена и в известной мере разрешена задача анализа и обобщения опыта наших машиностроительных заводов по экономии электроэнергии на основе рационализации технологии в ее комплексной связи с энергетикой. Раскрытие тесной связи энергетики с технологией производственных процессов является в этой книге основной идеей, объединяющей рассмотрение различных сторон общей проблемы экономии электроэнергии в промышленности. В связи с этим книга рассчитана на широкий круг инженерно-технических работников — энергетиков и технологов.

Автором главы I (стр. 9—49) «Рационализация технологии и экономия электроэнергии» является член-корр. АН СССР В. И. Вейц; главы II (стр. 50—97) «Электрические печи (электронагрев и электротермия)» — проф. Л. И. Аронов; главы III (стр. 98—130) «Рабочие машины. Рационализация технологических процессов, рациональное использование рабочих машин и электродвигателей» — доктор техн. наук, проф. С. А. Пресс; главы IV (стр. 131—154) «Рабочие машины. Устранение холостых ходов рабочих машин» — кандидат техн. наук Л. В. Литвак; главы V (стр. 155—175) «Электросварка. Ручная дуговая сварка» — доктор техн. наук, проф. Н. С. Сиунов; главы VI (стр. 175—183) «Электросварка. Автоматическая дуговая сварка» — кандидат техн. наук С. М. Тиходеев; главы VII (стр. 184—208) «Рекуперация электрической энергии» — кандидат техн. наук П. А. Свириденко.

В первой главе даны принципиальные положения и направления в решении задач, связанных с проблемой экономии электроэнергии. Именно в этой главе уделяется особое внимание рассмотрению связи энергетики с технологией и делаются основные обобщения в этой области.

Придавая большое значение электрификации в прогрессе техники и развитии народного хозяйства, автор главы вместе с тем считает, что в условиях напряженного баланса электроэнергии, в целях экономии электроэнергии, необходимо там, где это допускается по условиям технологического процесса и по технико-экономическим показателям, заменять электроэнергию другими энергоносителями.

Так, по мнению автора, следует выплавку высококачественных сталей производить в ряде случаев не электрометаллургическим, а пирометаллургическим способом (мартены, бессемеры). Наряду с экономией электроэнергии такая замена энергоносителя может при определенных условиях дать значительное снижение капитальных затрат при сохранении высоких качественных показателей. В ряде процессов плавки цветных металлов и легких сплавов электрические печи рекомендуется заменить газовыми печами, особенно новым типом их с радиационными трубками. Значительная экономия может быть достигнута заменой электроэнергии в процессах нагрева, сушки и термообработки другим энергоносителем; технические и экономические преимущества такой замены иллюстрируются на примерах уральских заводов.

Большое значение имеет сокращение объема «электроемких» работ путем рационализации или изменения техно-

логического процесса. В качестве примера указывается на заменуковкиштамповкой и сварными конструкциями, на замену в литейных цехах отливки в песчаные формы кокильным литьем и т. п.

Считая необходимыми мероприятия по экономии электроэнергии непосредственно в энергоустановках, автор правильно исходит из того положения, что важнейшими являются мероприятия по экономии электроэнергии, обусловленные рационализацией технологических процессов.

По поводу замены электроэнергии другими энергоносителями в отдельных технологических процессах необходимо отметить следующее.

Как уже было сказано, в книге предлагается заменять в некоторых случаях электрометаллургический способ выплавки высококачественных сталей пирометаллургическим способом. При всех достоинствах последнего способа рекомендация этого мероприятия для существующих предприятий необоснована. Пирометаллургический способ плавки качественных сталей может быть рекомендован для предприятий, вновь проектируемых вблизи топливных баз. Необходимые в связи с такой заменой дополнительные сооружения для существующих предприятий весьма значительны и требуют капитальных затрат. В связи с этим целесообразность перевода на действующих заводах выплавки ряда марок стали с электропечей на мартены или малые бессемеры должна в каждом отдельном случае соответствующим образом обосновываться с учетом местных условий. То же можно сказать о переводе процесса плавки силумина на газовые печи взамен электрических. С такой же осторожностью следует также подходить к комбинированному использованию энергоносителей, т. е. к дуплекс-процессу, для существующих предприятий. При всей очевидности преимуществ дуплекс-процесса, он (в целях экономии электроэнергии) не может быть рекомендован с такой категоричностью для действующих предприятий.

Автор правильно ставит вопрос о большом принципиальном значении экономии электроэнергии в государственном масштабе. С этой точки зрения неосценимое значение имеет кооперирование предприятий, при котором незначительное увеличение расхода электроэнергии в одном звене может обеспечить большие источники экономии электроэнергии в другом звене одной и той же цепи. Приведенные в связи с этим примеры в достаточной мере иллюстрируют правильность этого положения.

В главе недостаточно уделено внимания вопросам рационализации производства и потребления сжатого воздуха, кислорода, насосным установкам, что, видимо, объясняется ограниченными размерами работы.

Глава вторая рассматривает вопросы экономии электроэнергии в электрических печах и подытоживает богатейший материал, накопленный нашими передовыми предприятиями в борьбе за рационализацию электросталеплавленного производства. Весьма подробно рассматриваются вопросы подготовки шихты и способы ее загрузки, рациональность выбора того или иного процесса, организация скоростных плавов и результаты их применения, мероприятия по снижению тепловых потерь и улучшению теплоизоляции, борьба с эксплуатационными простоями оборудования и рационализация электрического режима.

Отдельный раздел посвящен вопросам возможного в ряде случаев замена электрического нагрева топливным и комбинированию обоих способов нагрева. Материал широко иллюстрирован примерами из практики работы предприятий, насыщен конкретным цифровым материалом и приносит большую пользу работникам нашей промышленности, эксплуатирующим электрические сталеплавильные печи.

В главе совершенно не рассмотрен вопрос об индукционном нагреве. На ряде наших заводов индукционный нагрев с успехом вытесняет ряд технических операций, проводимых в электрических печах сопротивления; в частности, вытесняются такие энергоемкие операции, как цементация или азотизация. Из новых методов термообработки не затронут также метод прямого контактного нагрева. Между тем, опыты, проведенные на Горьковском автозаводе, показали, что при нагреве валов таким методом получают вполне удовлетворительные результаты, причем время нагрева вала сокращается с 4,5—5,5 час. до 11—12 мин.

Большое значение имеет в настоящее время переход при термической обработке ряда деталей на значительно менее энергоемкие изотермические процессы, осуществляемые с помощью соляных ванн. Последние конструкции таких ванн, с весьма интенсивной электромагнитной циркуляцией соли, получаемой благодаря специальной форме электродов, обеспечивают значительное увеличение скорости нагрева или остывания деталей, а следовательно, и уменьшения расхода энергии. Вопросы внедрения такого рода ванн также не затронуты в рецензируемой книге.

В разделе «Замена электрического нагрева тепловым и комбинирование обоих способов нагрева» рассматривается вопрос замены электроплавки легких сплавов плавкой в газовых печах. При этом автор приходит к выводу о целесообразности замены электрических печей сопротивления для плавления алюминия типа САН газовыми печами, не упоминая совершенно об индукционных печах с железным сердечником. Между тем, переплавка алюминия в таких печах является задачей, полностью разрешенной нашей промышленностью, при этом получается не только экономия электроэнергии по сравнению с печами САН (150—100 кВт на 1 т алюминия), но и значительное уменьшение утара алюминия, особенно по сравнению с газовыми печами. А так как на получение каждой тонны алюминия затрачивается до 20 000 кВт, то широкий перевод переплавки алюминия на газ может, в конечном счете, дать не экономно, а перерасход электрической энергии.

Спорным является и расположение материала в главе. Основные типы электрических печей, печи сопротивления, дуговые, индукционные и руднотермические предназначены для выполнения разных задач и применяются на разных производствах. Между тем, в книге не проводится разделение материала по типам печей; например, рационализация подготовки шихты сталеплавильной печи и ее загрузка искусственно объединены с вопросами увеличения загрузки термических печей сопротивления, в результате чего отдельные вопросы, касающиеся печей сопротивления или руднотермических, теряются в массе материала, посвященного сталеплавильным печам. Более наглядно было бы расположить материал главы по типам рассматриваемых электрических печей.

В связи с этим следует указать, что приведенная в начале главы классификация электрических печей является спорной.

Нельзя выделять самостоятельные разделы рассмотрение печей сопротивления с металлическими и неметаллическими нагревателями и электросоляных ванн, равноценные разделам дуговых или индукционных печей. Все они являются печами сопротивления и применение в них металлических и неметаллических нагревателей является таким же непринципиальным вопросом, как и применение угольных или графитовых электродов в дуговых сталеплавильных печах.

Из многообразных рабочих машин в третьей главе рассматриваются, главным образом, металлорежущие станки и лишь частично некоторые другие машины: краны, прокатные станы и кузнечно-прессовые машины. Учитывая малый объем, уделяемый этим последним видам машин, было бы правильнее уточнить наименование главы, назвав ее «Металлорежущие станки».

Недостаточность изученности технологических процессов кузнечно-прессовых машин и прокатных станов явилась следствием того, что из большого числа технологических факторов, определяющих энергетiku работы этих машин, автор остановил свое внимание на температуре, высказав при этом общеизвестное положение о том, что с уменьшением температуры расход энергии увеличивается.

Автор указывает, что в отношении других технологических параметров обжатия и скорости (при обработке давлением), общие указания дать затруднительно. Попытку дать такое указание в отношенииковки и штамповки, где им рекомендуется в целях уменьшения скорости деформации, а значит, и расхода энергии, применять взамен молотов — ковочные прессы, нужно считать неудачной. Замена молота прессом может привести в ряде случаев к увеличению расхода энергии за счет более низкого к. п. д. некоторых прессов по сравнению с к. п. д. некоторых типов молотов.

Автор отмечает значительное влияние на величину расхода энергии сечения стружки и со всей очевидностью доказывает, что расход энергии на единицу снимаемого металла уменьшается с увеличением сечения стружки, т. е. с увеличением рабочего усилия. На практике реализация этого указания значительно усложняется технологическими соображениями, прочностью резцов и отдельных элементов станка. К сожалению, автор не привел примеров, показывающих результат использования этой рекомендации.

В разделе «Рациональное использование электродвигателей» рассматриваются вопросы сокращения потерь в электродвигателях при неполной их загрузке путем замены двигателей менее мощными или путем переключения обмоток для уменьшения магнитного потока. Совершенно правильно показывается, что оба эти мероприятия дадут заметный эффект лишь при малой (меньше 40—50%) загрузке двигателей. Автором, однако, при установлении наиболее выгоднейшей загрузки электродвигателя совершенно не рассматривается влияние потребления реактивной мощности на потери в сетях. Установление режима двигателя только с точки зрения улучшения коэффициента мощности или наибольшего к. п. д. электродвигателя в одном каком-либо режиме без учета потерь в сети часто приводит к увеличению общих потерь. Очень важно указание автора, что эти средства лишь частично достигают цели и могут быть рекомендованы только в случаях, когда повышение загрузки станка невозможно.

Последний раздел главы посвящен вопросам снижения потерь в станках и, главным образом, потерь холостого хода. Автор предлагает для этой цели нормирование потерь холостого хода в станках, которое должно производиться на станкостроительных заводах.

Вряд ли можно считать целесообразным нормирование потерь холостого хода, поскольку их величина может значительно колебаться в зависимости от ряда изменчивых факторов: качества смазки и рода смазочного материала, температуры, степени износа и т. д.

Все же контроль потребляемой мощности холостого хода необходимо рекомендовать, как удобное средство контроля за общим состоянием станка.

Основной вопрос, связанный с устранением холостых ходов рабочих машин и применением ограничителей холостого хода, останавливающих электропривод на время пауз в работе станка, освещается в четвертой главе книги. Поскольку такая остановка связана с последующим пуском, то эффективность этого метода может быть установлена путем сравнения расхода энергии (активной и реактивной) при холостом ходе с расходом при пуске. В этих целях автором выводится для практических расчетов достаточно точная формула для «времени холостого хода». Дается также формула для допустимой с точки зрения нагревания электродвигателя частоты его включений. Предложения и выводы, данные в главе, должны способствовать дальнейшему внедрению ограничителей холостого хода в целях экономии энергии в металл обрабатывающей промышленности.

Главы пятая и шестая книги посвящены экономии электроэнергии при ручной дуговой электросварке и при автоматической дуговой электросварке. Включение этих глав в сборник следует безусловно одобрить. Электрическая сварка является мощным потребителем энергии. На ряде крупных заводов электрическая мощность сварочного

оборудования составляет более 25% всей установленной мощности этих предприятий. Исследования и расчеты показывают, что во многих случаях практики вследствие неправильного выбора сварочного оборудования, неудовлетворительной его конструкции, нерационального режима сварки энергетический к. п. д. электросварки оказывается крайне низким (не превышая в некоторых случаях 3—4%).

Реализация основных рекомендаций глав пятой и шестой книги позволит сэкономить для страны миллионы киловатт-часов энергии.

Наибольший интерес в пятой главе представляют данные об удельных расходах электроэнергии при различных источниках питания дуговой сварки и основные сведения о результатах использования в производственных условиях: а) повышенных (против обычных) сил тока в сочетании с предварительной укладкой в разделку шва дополнительного присадочного металла; б) трехфазной дуги вместо обычно применяемой однофазной. Полезны также сведения о роли вторичного напряжения источников питания, возможных путях его снижения при сохранении достаточной стабильности дуги. Значительную практическую ценность представляют указания о способах приспособления мощных несварочных, в частности печных, трансформаторов для многопостовой сварки переменным током.

Пятая глава не лишена вместе с тем недостатков. Не во всех случаях влияние того или иного мероприятия на расход энергии сопровождается указанием на возможное изменение качества и стоимости. В частности, сведения об удельных расходах энергии при различных источниках питания дуги следовало снабдить указаниями о возможном влиянии источников питания на качество сварки и хотя бы ориентировочную стоимость. Не для всех случаев практики правильно утверждение о том, что основным недостатком существующего оборудования является его универсальность и вытекающая отсюда рекомендация отказа от выпуска универсальной аппаратуры (стр. 163).

В главе недостаточно освещены такие эффективные пути экономии энергии, как: выбор рациональной конструкции свариваемых кромок (использование бескосных соединений, уменьшение угла скоса, увеличение притупления); обеспечение надлежащей сборки (минимально необходимых зазоров между свариваемыми кромками); применение электродов с большим коэффициентом наплавки и др.

В шестой главе книги приведены краткие сведения о сущности, возможных областях применения и энергетических характеристиках основных способов автоматической сварки.

В соответствии со значением и применением отдельных способов автоматической сварки наибольшее внимание в главе уделено автосварке под слоем флюса по способу Е. О. Патона.

К недостаткам главы следует отнести отсутствие данных о качестве соединения и хотя бы ориентировочной стоимости его осуществления при различных способах ав-

томатической сварки. Без этого судить о целесообразности того или иного способа сварки не представляется возможным. Излишне подробно освещены некоторые вопросы (описание способов сварки, областей их применения, теории токопрохождения через дугу), не имеющих прямого отношения к рассматриваемому вопросу. Недостаточно освещен вопрос о выборе источников питания дуги для автоматической сварки под слоем флюса и рационального типа соединения.

Серьезным недостатком следует считать отсутствие в книге главы по вопросам экономии энергии при контактной сварке, являющейся также весьма крупным и часто мало экономичным потребителем электроэнергии в стране.

Необходимо отметить неправильное название седьмой главы, так как в ней вопросы рекуперации энергии, в общепринятом смысле этого слова, не рассматриваются. В действительности же в главе рассматриваются вопросы генерации электрической энергии тепловыми, в частности, автодвигателями при их испытании. В главе рассматривается несколько схем электрических установок, обеспечивающих работу электрических нагрузочных машин в режиме генераторов с отдачей энергии в сеть при широком диапазоне изменения их скоростей. Глава в основном носит описательный характер. Материал составлен на основе работ Энергетического института Академии Наук СССР, проводившихся в период 1942—1943 гг.

Касаясь общей оценки книги, необходимо отметить, прежде всего, что основные принципиальные обобщения и центральная идея — комплексной связи энергетики с технологией производственных процессов промышленности, — выдвинутые в первой главе книги, не получили должного развития и обоснования в последующих главах. По своему содержанию, оснащению фактическим материалом и его обобщению главы книги неравноценны. В книге не уделено внимания вопросам правильного выбора наиболее экономичного режима работы отдельных агрегатов, наивыгоднейшей загрузки параллельно работающих агрегатов, вопросам экономии электроэнергии при контактной сварке, индукционному нагреву, рациональному режиму работы кузнечно-прессового и прокатного оборудования, компрессорных и насосных установок, литейных цехов и т. п. В книге отсутствует библиография, если не считать ссылок в тексте.

Подводя итоги, необходимо отметить, что в целом книга заслуживает одобрения и представляет значительный интерес для широкого круга инженерно-технических работников.

Бригада МОНИТОЭ:

Доктор техн. наук, проф. А. Т. ГОЛОВАН
Доцент Н. Л. КАГАНОВ
Кандидат техн. наук Р. Ю. МАЛАЯ
Доцент А. Д. СВЕНЧАНСКИЙ
Инж. А. А. ТАЙЦ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Продолжается подписка
на 1948 г.

НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР И МИНИСТЕРСТВА
ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

Основан в 1880 году Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области исследования и применения электричества и освещает основные теоретические и практические проблемы, связанные с развитием электротехники и электрификации СССР

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ НА ПОЧТЕ И В ОТДЕЛЕНИЯХ
«СОЮЗПЕЧАТИ»

12

номеров в год
по 12 печ.
листов

Подписная
цена на год
96
рублей