

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1952



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

3

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

3
1952
МАРТ

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

СОДЕРЖАНИЕ

С. Г. Таманцев — Синхронный генератор с самовозбуждением от механического выпрямителя и автоматическим регулированием напряжения	3
Б. М. Шляпошников и А. В. Поссе — Работа ионных преобразователей при несинусоидальном напряжении переменного тока	8
А. А. Ермилов — Комплектные распределительные устройства для промпредприятий	17
Л. Б. Гейлер — Электрический вал трехфазного тока в электроприводах металлорежущих станков	24
А. А. Акопян и В. П. Ларионов — Экспериментальное изучение импульсного разряда в длинном промежутке	31
Д. П. Ледянский — Пути повышения искусственной устойчивости синхронных генераторов	34
И. Н. Попов — Чувствительная защита от замыканий на землю с кабельными трансформаторами тока	38
Г. М. Розанов — О вертикальном расстоянии между проводами в гололедных районах	44
В. К. Плюгачев — Аналитический способ расчета разомкнутых сетей со стальными проводами	48
Л. С. Лурье — Коэффициент мощности несимметричной нагрузки трехфазной сети	52
Г. А. Чайнов — О наибольшей величине к. п. д. четырехполюсника	59
Б. П. Терентьев — Борьба с помехами от генераторов высокой частоты для промышленных целей	60
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
М. М. Бланешников — Расчет люминесцентного освещения общественных и административных помещений	64
СТАНДАРТЫ И НОРМЫ	
А. Я. Егерман — О практической единице меры тока в системе МКСА	68
К. М. Поливанов — Определение электрических единиц абсолютной практической системы	69
Д. В. Кротков — Новые стандарты на стальные изделия для электрических установок	75
А. М. Ганелин — Провода стальные многопроволочные для воздушных электрических линий передач	78
ДИСКУССИИ	
К вопросу об экономической плотности тока Б. Л. Эрлихман.	81
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
О книге „Грозозащита промышленных сооружений и зданий“. К статье „Вопросы нормирования испытательных и разрядных напряжений высоковольтных трансформаторов, аппаратов и изоляторов“	85
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Преобразователь частоты тока И-88. Электрический трелевочный трактор. Дроссель переменного насыщения для автомобильных генераторов переменного тока. Индукционный разогрев битума. Штепсельное соединение сварочного провода. Измерение параметров тока молнии на высоковольтных линиях электропередачи. Тепловые испытания трансформаторов. Воздушные выключатели наружной установки	87
ХРОНИКА	
В Научно-техническом обществе ВЗЭИ. Профессор Л. А. Жекулин	93
БИБЛИОГРАФИЯ	
Г. А. Сисоян — Книга Н. В. Огорокова „Электроплавильные печи черной металлургии“	95
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. И. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**,
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Буткевич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Гла-**
зунов, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, кандидат техн. наук
И. А. Сыромятников, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**.

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К-4-24-80

Адрес для телеграмм: Москва, Электричество.

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт,
почтовый ящик № 648.

Синхронный генератор с самовозбуждением механического выпрямителя и автоматическим регулированием напряжения

Инж. С. Г. ТАМАНЦЕВ

Научно-исследовательский институт МЭП СССР

Современные трехфазные синхронные генераторы являются двухмашиными агрегатами, состоящими из собственно генератора трехфазного тока и возбuditеля — генератора постоянного

тока. Наличие генератора постоянного тока, имеющего мощность 2 ... 7% мощности установки,

делает повышенную ее уязвимость. Согласно статистическим данным виновником 83% аварий генераторами малой и средней мощности следует считать возбuditель и лишь 17% из них могут быть отнесены за счет генератора.

Кроме того, при малой мощности генератора возбuditель становится соизмеримым с ним по габаритам и стоимости. Поэтому вполне понятно, что с первых лет развития электромашиностроения на трехфазном переменном токе было сделано большое число попыток использовать механический выпрямитель в качестве источника постоянного тока для возбуждения синхронных генераторов малой и средней мощности, до 250 ква.

Начиная с первого опыта, проведенного более 20 лет назад на венгерском электромашиностроительном заводе «Ганц», все попытки создания механического выпрямителя со скользящим контактом не увенчались успехом. Разработкой полупроводниковых выпрямителей позволено последнее время создать синхронные генераторы с выпрямителями этого типа мощностью до 65 ква. Однако встроенный механический выпрямитель приводит к «срастанию» двух агрегатов в одну, что не достигается при использовании ионных и электронных выпрямителей. Поэтому конструкторы электромашиностроительных заводов не прекращали работ по созданию встроенного механического выпрямителя в схеме синхронного генератора.

В Советском Союзе сельской электрификации и механизации трудоемких процессов сельского хозяйства, строительстве и транспорте предъявляют к синхронным генераторам повышенные требования. Наличие двух-

Описаны принципы действия, технико-экономические и эксплуатационные достоинства синхронных генераторов с механическим выпрямителем, в которых путем применения компаундирующего трансформатора тока достигается автоматически, в зависимости от величины и характера нагрузки, поворот вектора результирующего напряжения возбуждения до его совпадения с вектором напряжения холостого хода вспомогательной обмотки возбуждения, чем, в основном, обеспечивается безискровая коммутация выпрямителя. Схема также осуществляет автоматическое компаундирование выходного напряжения генератора по нагрузке, что исключает потребность в регуляторе напряжения. Работа удостоена Сталинской премии за 1950 г.

машинного агрегата вызывает эксплуатационные затруднения на мелких и средних сельскохозяйственных электростанциях и различных передвижных и стационарных установках. С расширением поля деятельности местных электростанций становится обязательным автоматическое регулирование напряжения на ши-

нах электростанций, особенно для сетей, питающих кино- и радиоустановки.

Проблема встроенного механического выпрямителя со скользящим контактом не была решена в странах Западной Европы и в Америке. В Советском Союзе к практической разработке этой проблемы приступили в 1944 г. в Научно-исследовательском институте Министерства электропромышленности.

Предварительное ознакомление с состоянием вопроса по работам ряда зарубежных ученых (Арнольд, Лакур, Александерсен, Коппельман и др.) подтвердило сложность и теоретическую неясность решаемой проблемы, а также и отсутствие экспериментальных данных, характеризующих физическую основу работы встроенного механического выпрямителя.

Например, методы расчета компаундированных схем самовозбуждения, предложенные Арнольдом и Лакуром, были основаны на том, что выпрямитель трехфазного тока вместе с цепью возбуждения, которую он питает, условно наделялся свойствами трехфазной нагрузки, состоящей из линейных сопротивлений. Такое допущение могло дать лишь весьма неточное представление о процессах и соотношениях в схеме, что и подтвердилось позднее при разработке рассматриваемой схемы коммутации.

Александерсен (США), решая проблему встроенного механического выпрямителя в схеме синхронного генератора, рассмотрел конструктивную сторону задачи, но не разобрался в сложной физической сущности коммутационного процесса. Несмотря на усовершенствования, которые были им введены в схему венгерского завода «Ганц», ему не удалось решить задачи.

Поэтому в основу задачи в Институте было поставлено предварительное экспериментальное изучение работы встроенного механического выпрямителя с однополупериодным и двухполупериодным выпрямителем на генераторах мощностью 3 кВа, 230 в, 3 000 об/мин и 15 кВа, 400 в, 1 000 об/мин.

Для питания обмотки возбуждения синхронного генератора применялась вспомогательная трехфазная обмотка, закладываемая в несколько пазов статора, под клин. Трехфазное напряжение от этой обмотки подавалось через небольшое активное сопротивление при помощи щеток к разрезному контактному кольцу (механический выпрямитель), которое питало обмотку возбуждения генератора постоянным током.

Изучение работы встроенного механического выпрямителя в синхронном генераторе показало, что его следует классифицировать как обращенный генератор постоянного тока, у которого сталь якоря, — общая со сталью статора синхронной машины, что приводит к «срастанию» обеих машин агрегата. Благодаря тому, что выпрямитель вращается вместе с приемником постоянного тока (роторные катушки), можно щетки заменить секторами выпрямителя, а коллекторные пластины — неподвижными щетками. Такая схема значительно облегчает конструкцию щеточного аппарата, выгодно отличая ее от вращающихся щеток в «трансвертере» Хейфильда и Кальверли (Англия).

Рассматривая встроенный механический выпрямитель как обращенный генератор постоянного тока, становится понятным, почему момент начала коммутации в схеме синхронного генератора непостоянен. Дело в том, что неподвижные секции якоря находятся во вращающемся поле синхронного генератора и поэтому подвержены влиянию внутреннего угла θ синхронной машины.

Аналогичная картина наблюдалась и при схеме Ларионова. Экспериментальными работами, проведенными на генераторах различных мощностей и различной скорости вращения, было доказано, что:

1) для заданных режима и нагрузки всегда можно найти такое положение траверсы, при котором возможна безискровая коммутация, при условии, что рабочая ширина щетки равна ширине холостого сектора выпрямителя;

2) с увеличением нагрузки следует повернуть траверсу по направлению вращения генератора для получения безискровой коммутации, а при уменьшении нагрузки — против направления вращения;

3) при переходе с индуктивной нагрузки на активную необходимо повернуть траверсу по направлению вращения генератора, а при переходе с активной на индуктивную или смешанную — против направления вращения;

4) при ширине щетки, равной ширине холостого сектора, отключение фазы не имеет места; переключение фазы вспомогательной обмотки с положительного сектора выпрямителя на отри-

цательный осуществляется без отключения, что дает наилучший режим темной коммутации в машинах постоянного тока, чего нельзя достичь при однополупериодном выпрямлении.

В свете этих выводов намечались схемы, необходимой для решения поставленной задачи. Надо было обеспечить при любой нагрузке автоматический поворот вектора напряжения на зажимах вспомогательной обмотки к направлению вектора Э. д. с. холостого хода, чтобы парализовать влияние внутреннего угла θ синхронной машины.

Разработка различных вариантов схем испытания позволили остановиться на варианте поворота вектора при помощи однофазных трансформаторов тока, шунтированных небольшим активным сопротивлением и включенных последовательно в каждую фазу фазной обмотки возбуждения, расположенной под таким углом к основной обмотке, чтобы вектор суммы напряжения на ее зажимах и внутреннего напряжения трансформатора тока практически оставался в коммутационной зоне непременным в диапазоне от холостого хода до нагрузки.

Синхронная машина так же, как и машина постоянного тока, обратима, иначе говоря, может работать в режимах генератора или двигателя в зависимости от того, подведем ли к ней механическую или электрическую энергию. Поэтому все выводы, полученные для синхронного генератора, можно распространить и на синхронный двигатель со встроенным механическим выпрямителем. Однако для реверсивных двигателей схему следует несколько видоизменить, для из следующих соображений.

Напряжение на щетках, т. е. результирующий вектор напряжения на зажимах вспомогательной обмотки и вторичного напряжения трансформатора тока, остается неподвижным в коммутационной зоне (линия Э. д. с. холостого хода) в диапазоне от холостого хода до полной нагрузки благодаря относительному угловому положению осей вспомогательной и основной обмоток. Поэтому эту задачу можно решать не только расположением дополнительной трехфазной обмотки под углом к основной обмотке, но и расположением основной обмотки под углом к дополнительной или, что то же самое, поворотом вектора нагрузки. Такое решение допускает реверсирование синхронных машин без всяких пересоединений, очень существенно при конструировании реверсивных синхронных двигателей.

Поворот вектора тока нагрузки легко осуществляется обмотками трансформатора тока и добавлением нескольких витков одной из других фаз (зигзаг) в зависимости от того, какой поворот нужен, левый или правый.

На основании исследовательских работ, которые позволили выявить основные физические явления, управляющие работой механического выпрямителя, была разработана теория встроенного механического выпрямителя и предло-

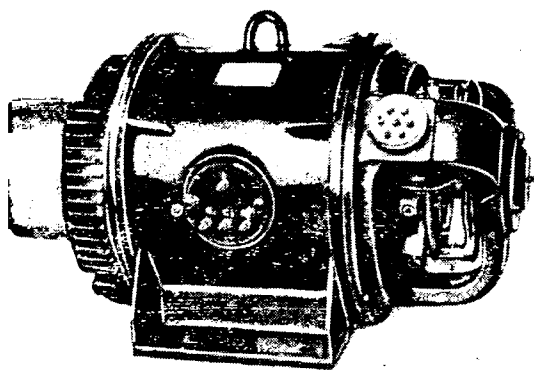


Рис. 1. Генератор с механическим выпрямителем (общий вид).

аналитический метод расчета компаундированного синхронного генератора со встроенным механическим выпрямителем.

Сходя из простейших векторных диаграмм, выведены (приложение) зависимости между основными параметрами синхронного генератора и компаундирующих трансформаторов тока от насыщения стали машины с нагрузкой. В синхронных генераторах внутренний угол возбуждения θ и угол γ — поворота главного тока при помощи зигзага на трансформаторе тока подбираются так, чтобы величина линейного тока возбуждения каждого значения тока нагрузки (индуктивной и смешанной) соответствовали регулировочной характеристике с тем, колебания напряжения на зажимах генератора удовлетворяли техническим требованиям (от номинального значения).

Синхронные генераторы с возбуждением от механического выпрямителя и с автоматическим регулированием напряжения (рис. 1, 2) имеют большие эксплуатационные, технические и экономические преимущества:

Автоматическое регулирование напряжения генератора в пределах $\pm 4\%$, что значительно повышает его устойчивость при переходных процессах. Генератор допускает запуск асинхронных двигателей, мощность которых составляет 10% от мощности генератора.

Возможность десятиминутной аварийной работы при полном обрыве одной фазы.

Исключается размагничивание при повторных замыканиях и генератор самовозбуждается от остаточного намагничивания, даже в случае, если фазное напряжение вспомогательной обмотки равно $0,3$ в, и поэтому генератор не нуждается ни в пусковых устройствах, ни в вентильных втулках и реле самовозбуждения, как это имеет место у генераторов с возбуждением от селеновых выпрямителей.

Генератор с механическим выпрямителем, все компаундированные синхронные гене-

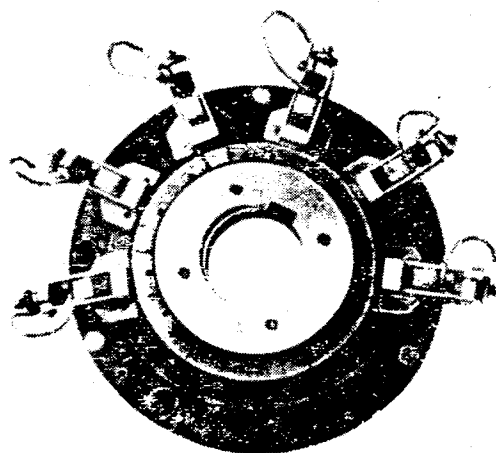


Рис. 2. Трехфазный механический выпрямитель (траверса и разрезное кольцо).

раторы, обеспечивает стабильность системы при параллельной работе. Машины проектируемой Всесоюзной серии еще в большей степени обеспечивают эту возможность, так как ОКЗ большинства генераторов около единицы, а у малых мощностей даже доходит до $1,2$. Кроме того, относительно высокое значение ОКЗ при автоматическом поддержании напряжения генератора в значительной степени облегчает работу компаундирующего устройства и позволяет удерживать напряжение в пределах $\pm 2,5\%$ при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной.

Возбуждение синхронного генератора от механического выпрямителя и компаундирующего устройства не налагает никаких дополнительных условий, которые требовали бы изменения параметров генератора.

Конструкция машины значительно упрощается, так как отпадает возбудитель, а механический выпрямитель (одно разрезное кольцо) монтируется взамен двух контактных колец и не требует никаких конструктивных изменений в генераторе. Добавления сводятся к нескольким виткам вспомогательной обмотки, укладываемой под клин статора, и небольшой выводной коробки для нее.

Система возбуждения при помощи механического выпрямителя была проверена на синхронных генераторах мощностью $15, 20, 25$ и 60 кВА, 400 в, 1000 об/мин. В настоящее время удачно закончены испытания вертикального генератора мощностью 50 кВА, 400 в, 750 об/мин. Колебание напряжения на зажимах генератора оказалось равным $\pm 2,5\%$.

На основании полученных результатов с 1949 г. начато серийное производство этих генераторов мощностью 15 и 25 кВА, 380 в, 1000 об/мин.

Генераторы серийного производства показали дополнительно следующие преимущества: длина генератора сократилась на 150 и 200 мм; вес генераторов уменьшился на 12% , как результат

снижения веса цветных и черных металлов; стабильность напряжения составляет $\pm 3,5\%$; установившийся ток короткого замыкания не превосходит 150...200% от номинального тока вместо 250% у обычных синхронных генераторов.

Генератор допускает запуск асинхронных двигателей, мощность которых составляет 100% мощности генератора.

Благодаря наличию компаундирующих трансформаторов тока сократилась длительность переходных процессов.

Отсутствие возбудителя резко упрощает технологию производства.

Повысилась надежность работы генераторов и снизилось число аварий, что отмечено в отзывах эксплуатации.

Упростился и удешевился надзор за генератором и отпала потребность в квалифицированном эксплуатационном персонале.

Стоимость генератора со встроенным механическим выпрямителем значительно ниже стоимости генератора с возбудителем и автоматическим регулятором напряжения.

При механическом выпрямителе стоимость генератора 25 кВА, 400 В, 1 000 об/мин на 35% ниже стоимости генератора с возбудителем и автоматическим регулятором напряжения. С увеличением мощности генератора процент снижения стоимости падает и для генераторов мощностью 250 кВА, 400 В, 1 000 об/мин он составляет только 20%.

Приложение. Элементы графоаналитического расчета системы возбуждения с механическим выпрямителем. Схема возбуждения компаундированного синхронного генератора при помощи механического выпрямителя дана на рис. 3.

В схеме напряжение вспомогательной обмотки 3 трехфазного тока подается на щетки выпрямителя. Схеме приданы три однофазных трансформатора тока 2, вторичные обмотки которых шунтированы небольшими омическими сопротивлениями 5. Первичная обмотка трансформаторов тока обтекается током нагрузки. Назначение трансформаторов тока не только компаундировать возбуждение синхронной машины, но и создать такой вектор добавочной э. д. с., чтобы результирующая э. д. с. от вспомогательной обмотки и дополнительной э. д. с. сов-

падала при любой нагрузке с вектором э. д. с. холста.

Поясним сказанное упрощенной векторной диаграммой трехфазного синхронного генератора, компаундированного трансформаторами тока (рис. 4).

При построении диаграммы будем считать, что щетки генератора нагружены равномерно и, следовательно, можно ограничиться построением диаграммы только одной фазы; б) все переменные величины определяем только их первыми гармоническими.

На рисунке векторная диаграмма напряжений компаундированной синхронной машины одной фазы.

По оси ординат расположены векторы э. д. с. холста E_0 и E_e — главной и вспомогательной обмоток статора фазы 1. При нагрузке фазные напряжения на зажимах главной U_{12} и вспомогательной обмотки отходят от векторов холостого хода на внутренние токи главной статорной обмотки при индуктивной нагрузке отстают на угол φ от напряжений и равны I_1 и I_3 . Так как при нагрузке вектор напряжения главной обмотки отходит от вектора э. д. с. холста на угол θ , фаза дополнительной э. д. с. должна быть так выбрана, чтобы результирующая э. д. с. падала с направлением вектора. Тогда при работе выпрямителя нейтраль щеток сохраняется и выпрямитель не искрит. Для этого следует как это указано на диаграмме, к фазному напряжению U_{12} добавить $i_{2m}R_{ш}$, создаваемую на шунте вторичной обмотки трансформатора тока, обтекаемого током нагрузки вторичной обмотки. Соответственно к напряжению U_{23} следует добавить э. д. с., создаваемую током нагрузки третьей фазы, и, наконец, к напряжению U_{31} следует добавить э. д. с., создаваемую током нагрузки $i_{1m}R_{ш}$.

Фаза э. д. с., создаваемой на зажимах щеток, зависит от фазы тока $i_{1ш}$, протекающего по шунту. В свою очередь, фаза тока $i_{1ш}$, который по закону Ома является замыкающим вектором токов i_{12} и i_{13} в узле А (рис. 4), зависит от величины и фазы этих токов. Отсюда ясны условия безыскровой коммутации. Величина и фаза тока i_{2m} должна быть так выбрана, чтобы ток $i_{1ш}$, протекая по шунту $R_{1ш}$, создавал дополнительную э. д. с., равную $i_{1ш}R_{1ш}$, замыкающую угольник напряжений U_{12} , $i_{1ш}R_{1ш}$ и U_{13} , где $U_{1ш}$ — напряжение на щетке выпрямителя.

Величина вектора тока i_{2m} задается коэффициентом трансформации k трансформатора тока. Что касается направления вектора тока i_{2m} , то он может быть отложен в ту или иную сторону на угол $\pm 30^\circ$ или путем наложения вспомогательной обмотки по отношению к главной фазе. На схеме показан вариант поворота вектора против часовой стрелки при помощи «чужой» фазы за 3 для шунта $R_{1ш}$.

Перемена направления вращения синхронного генератора изменяет только чередование фаз при компаундировании. Никаких пересоединений фаз главной и вспомогательной обмоток при этом не приходится делать. Необходимо лишь повернуть траверсу на 180 электрических градусов.

В реверсивных синхронных двигателях можно не только вращать всякий раз траверсу, достаточно переключать при помощи контакторов только вторичные обмотки трансформаторов тока.

Если, например, при левом вращении (смотря со стороны механического выпрямителя) вторичная обмотка трансформатора фазы 2 присоединена к шунту фазы 1, вспомогательной обмотки (рис. 3), то при правом вращении вторичная обмотка этого трансформатора должна быть присоединена к шунту фазы 3 вспомогательной обмотки.

Соответственно производится пересоединение остальных фаз.

Условия безыскровой коммутации могут быть заданы, исходя из тригонометрических зависимостей между векторами токов и напряжений.

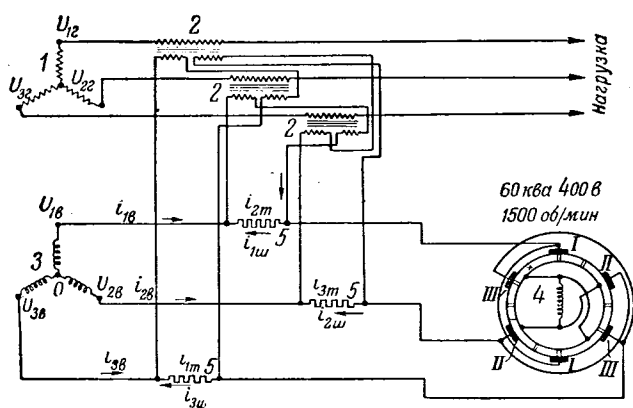


Рис. 3. Схема генератора с механическим выпрямителем. 1 — главная обмотка генератора; 2 — трансформаторы тока; 3 — вспомогательная обмотка генератора; 4 — индуктор; 5 — шунты трансформаторов тока; i_{12} — ток, обусловленный вспомогательной обмоткой; i_{2m} — ток трансформатора тока; $i_{1ш}$ — результирующий ток в шунте.

Работа ионных преобразователей при несинусоидальном напряжении переменного тока

Доктор техн. наук Б. М. ШЛЯПОШНИКОВ и кандидат техн. наук А. В. ПОССЕ
Ленинград

Переменный ток, забираемый ионным выпрямителем или, наоборот, отдаваемый ионным инвертором, содержит высшие гармоники. Поэтому напряжение на стороне переменного тока ионного преобразователя (выпрямителя и инвертора) всегда является несинусоидальным.

В простейшем случае, когда к сети переменного тока присоединен только один преобразователь, электромагнитные процессы, характеризующие его работу, обычно рассматриваются в предположении, что за сопротивлениями, учитывающими индуктивное влияние системы, действуют синусоидальные э. д. с. При таком подходе удается обойти вопрос о несинусоидальности напряжения на зажимах трансформатора преобразователя со стороны сети переменного тока.

Однако в настоящее время в связи с широким применением ионных преобразователей в электролизной промышленности и в железнодорожном транспорте, а также в связи с предстоящим внедрением их в область передачи энергии постоянным током возникает более сложный случай, когда к сети переменного тока оказываются присоединенными параллельно несколько преобразователей, могущих различаться между собой по своим схемам и по режиму работы.

Этот весьма важный для практики случай и исследован в настоящей статье, где на конкретном и реальном примере показано, что ионные преобразователи, присоединенные параллельно данному к общей сети переменного тока, оказывают существенное влияние на его рабочие характеристики и при некоторых условиях могут даже вызвать у него аварию.

Как это было показано ранее [Л. 1, стр. 208—212], высшие гармоники, содержащиеся в кривой напряжения переменного тока, влияют на постоянную и переменную составляющие э. д. с. выпрямителя. Аналогичное явление имеет место также и у инвертора, где э. д. с. изменяет свой знак. Возникающее в результате этого искажение кривой э. д. с. преобразователя влечет за собой, как это видно из дальнейшего, значительное изме-

Теоретически рассмотрено влияние несинусоидального напряжения переменного тока на линейные э. д. с. обмоток трансформатора, связанных с вентилями, на постоянную э. д. с. преобразователя, на внешние характеристики, на гармоники э. д. с. преобразователя, на углы коммутации и т. д. Полученные выводы охватывают выпрямительный и инверторный режимы. Описано новое устройство для обеспечения нормальной работы преобразователя при несинусоидальном напряжении переменного тока.

нение условий функционирования преобразователя в выпрямительном и инверторном режимах.

Исследуемый преобразователь. Рассмотрим ионный преобразователь с периодичностью $m = 12$, выполненный

двухтактной схемой, обеспечивающей прохождение тока в обоих направлениях по обмотке трансформатора, связанной с вентилями. Такой преобразователь должен иметь две секции, соединяющиеся между собой либо параллельно рез уравнивательный реактор² (рис. 1,а), либо последовательно (рис. 1,б). При любом из указанных способов соединения секций между собой преобразователь может быть выполнен с одним трехобмоточным трансформатором, у которого одна из обмоток, связанная с вентилями, соединена звездой, а вторая — треугольником (рис. 1,а) или с двумя двухобмоточными трансформаторами (рис. 1,б).

Выбор такого ионного преобразователя в качестве объекта анализа в выпрямительном и инверторном режимах обоснован тем, что они имеют перспективы применения в области электрической тяги и при передаче энергии постоянным током. К тому же здесь наличие высших гармоник в кривой напряжения переменного тока влечет за собой наиболее рельефно ощутимые последствия. Выводы, полученные при анализе э. д. с. преобразователя, могут быть распространены на другие схемы преобразователей.

В дальнейшем для определенности будем считать, что исследуемый преобразователь имеет один трехобмоточный трансформатор (рис. 1,а) с коэффициентом трансформации на фазу c_A у обмотки, выполненной звездой, и $c_\Delta = 1/c_A$ у обмотки, соединенной треугольником. При этом кривая напряжения переменного тока со-

¹ Периодичность преобразователя m равна числу полупериодов переменных коммутаций, осуществляемых его вентилями за период переменного тока.

² При синусоидальном напряжении переменного тока и при идентичном зажигании вентилях разность э. д. с. уравнивающаяся на обмотках уравнивающего реактора, содержит только переменную составляющую.

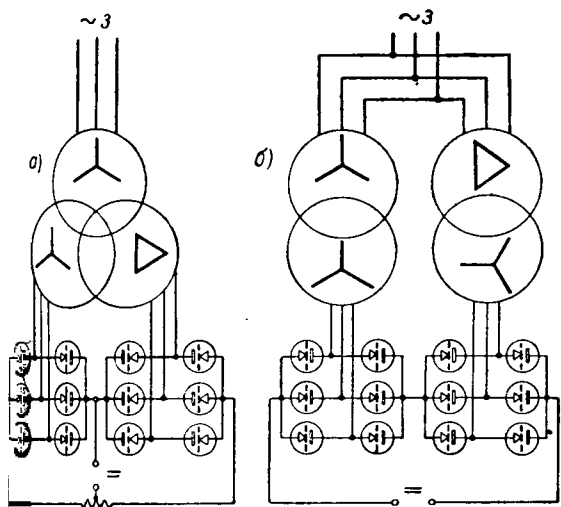


Рис. 1. Двухтактные схемы.

а) — параллельное соединение секций при одном трехобмоточном трансформаторе; б) — последовательное соединение секций при двух двухобмоточных трансформаторах.

высшие гармоники с порядковыми номерами $n = 6l \pm 1$, (1)

l может принимать любое целое положительное значение. Поэтому $n > 1$ и уравнение (1) охватывает все нечетные высшие гармоники, за исключением кратных трем, которые не могут содержаться в кривой напряжения, так как одна обмотка трансформатора соединена треугольником.

Как известно, высшие гармоники с порядковыми номерами, соответствующими уравнению (1), могут появиться в напряжении, приложенном к трансформатору преобразователя, даже при этом его ходе, если к сети переменного тока одновременно с преобразователем присоединены нелинейные нагрузки, например, другие преобразователи с разными периодичностями. В дальнейшем номера гармоник, соответствующие уравнению (1) l нечетному, будем обозначать символом n' , а соответствующих l четному — символом n'' .

Линейные э. д. с. обмоток трансформатора, соединенных с вентилями. Обозначим линейную э. д. с. обмотки, соединенной треугольником, символом e_{Δ} , а обмотки, соединенной звездой, символом e_{λ} . Пусть кривая фазной э. д. с. сети переменного тока

$$e_1 = e_{(1)}(\vartheta) + \sum e_{(n)}(\vartheta), \quad (2)$$

где $e_{(1)}(\vartheta)$ и $e_{(n)}(\vartheta)$ — соответственно основная и n -я гармоника³. Пренебрегая током холостого хода, можем написать, что

$$e_{\Delta} = \sqrt{3}e_1 = \sqrt{3} [e_{(1)}(\vartheta) + \sum e_{(n)}(\vartheta)], \quad (3)$$

$$e_{\lambda} = e_1(\vartheta) - e_1\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right).$$

Преобразовав последнее выражение, находим, что

$$e_{\lambda} = \sqrt{3} \left[e_{(1)}\left(\vartheta + \frac{\pi}{6}\right) + (-1)^l \sum e_{(n)}\left(\vartheta + \frac{\pi}{6}\right) \right], \quad (4)$$

где l задает номер высшей гармоники согласно уравнению (1).

Уравнения (3) и (4) написаны относительно одного и того же начала отсчета текущих углов $\vartheta = \omega t$. Если же в уравнении (4) начало отсчета перенести на угол $\frac{\pi}{6}$, то оно примет следующий вид:

$$e_{\lambda} = \sqrt{3} [e_{(1)}(\vartheta) + (-1)^l \sum e_{(n)}(\vartheta)]. \quad (4a)$$

Переходя к более конкретному написанию полученных уравнений (3) и (4a), получим, что

$$e_{\Delta} = \sqrt{3} [\sqrt{2}E_{(1)} \sin \vartheta + \sum \sqrt{2}E_{(n)} \sin n(\vartheta + \xi_{(n)})], \quad (5)$$

$$e_{\lambda} = \sqrt{3} [\sqrt{2}E_{(1)} \sin \vartheta + (-1)^l \sum \sqrt{2}E_{(n)} \sin n(\vartheta + \xi_{(n)})]. \quad (6)$$

Из этих уравнений, иллюстрируемых рис. 2 и 3, понятно, что основная волна и гармоники n'' , соответствующие четному l , одинаковы по амплитуде и фазе в кривых e_{Δ} и e_{λ} . Что же касается гармоник n' , соответствующих l нечетному, то они входят в сравниваемые э. д. с. с разными знаками.

В соответствии с этим находим, что линейные э. д. с. треугольника и звезды одинаковы между собой не только по действующему значению, но и по форме кривой только в том случае, если в кривой напряжения переменного тока содержатся одни лишь гармоники $n'' = 11, 13, 23, 25$ и т. д. Если же в этой кривой имеются гармоники $n' = 5, 7, 17, 19$ и т. д., то линейные э. д. с. треугольника и звезды, оставаясь равными между собой по действующему значению, оказываются различными и по своей форме (рис. 2, 3).

Последний случай имеет место, если к сети переменного тока параллельно с исследуемым преобразователем присоединен другой преобразователь с периодичностью $m = 6$.

Постоянная составляющая э. д. с. преобразователя. Внешние характеристики. Постоянная составляющая э. д. с. отдельных секций преобразователя находится по следующим уравнениям, справедливым как для выпрямительного, так и для инверторного режимов:

$$E_{d\Delta} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} e_{\Delta} d\vartheta \quad \text{и} \quad E_{d\lambda} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} e_{\lambda} d\vartheta,$$

куда вместо e_{Δ} и e_{λ} следует подставить правые части уравнений (5) и (6). Произведя необходимые математические преобразования, находим, что постоянная составляющая э. д. с. отдельных секций при любом значении угла регулирования α , отсчитываемого от начала основной волны ли-

³ Индексы, взятые в скобки, всюду указывают на порядковый номер гармоники, исчисляемый относительно основной волны напряжения переменного тока.

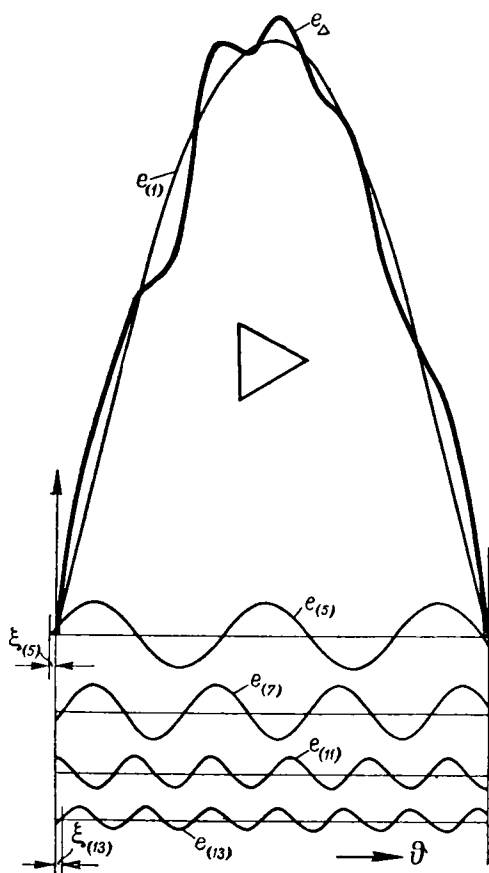


Рис. 2. Линейная э. д. с. обмотки трансформатора, соединенной треугольником, при некотором содержании гармоник в напряжении переменного тока.

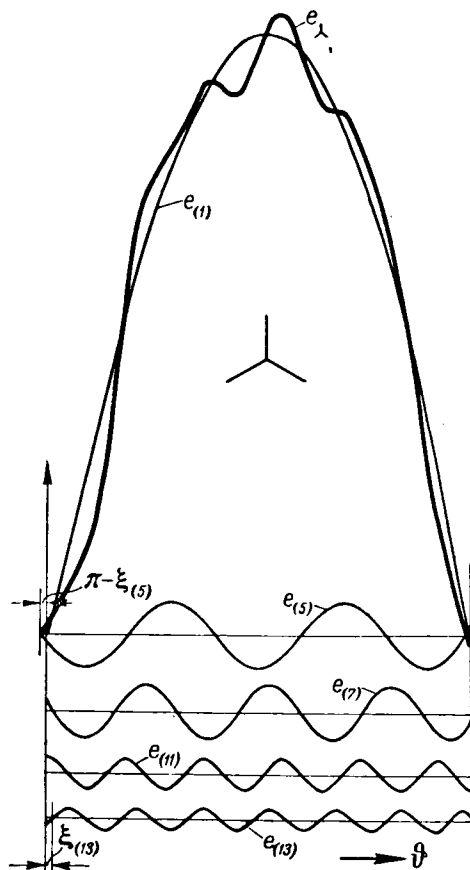


Рис. 3. Линейная э. д. с. обмотки трансформатора, соединенной звездой, при таком же содержании гармоник в напряжении переменного тока, как и на рис. 2.

нейной э. д. с. обмотки трансформатора, связанной с вентилями:

$$E_{d\Delta} = E'_d \left[\cos \alpha + \sum \frac{1}{n} w_{(n)} \cos n(\alpha + \xi_{(n)}) \right] \quad (7)$$

и

$$E_{d\Lambda} = E'_d \left[\cos \alpha + (-1)^l \sum \frac{1}{n} w_{(n)} \cos n(\alpha + \xi_{(n)}) \right]. \quad (8)$$

Здесь

$$E'_d = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} E_{(1)}$$

— постоянная составляющая э. д. с. отдельной секции преобразователя при чисто синусоидальной форме э. д. с. трансформатора и при $\alpha=0$, а

$$w_{(n)} = \frac{E_{(n)}}{E_{(1)}} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}}$$

— волнистость n -й гармоники, т. е. относительная величина, характеризующая удельный вес этой гармоники в э. д. с. трансформатора или, что то же самое, в напряжении переменного тока, приложенном к трансформатору при холостом ходе преобразователя.

Как и следовало ожидать, наличие гармоник n' , для которых число l — нечетное, приводит в общем случае к неравенству постоянных составляющих э. д. с. у отдельных секций ($E_{d\Delta} \neq E_{d\Lambda}$).

Возникающая разность постоянных составляющих э. д. с. секций

$$\Delta E_d = E_{d\Delta} - E_{d\Lambda} = 2E'_d \sum \frac{1}{n'} w_{(n')} \cos n'(\alpha + \xi_{(n')})$$

Если в напряжении сети переменного тока имеется только одна гармоника с порядковым номером n' , то относительное значение разности э. д. с. секций

$$\frac{\Delta E_d}{E'_d} = \frac{2}{n'} w_{(n')} \cos n'(\alpha + \xi_{(n')}).$$

Наибольшее значение этой разницы (по абсолютной величине) получится при $\cos n'(\alpha + \xi_{(n')}) = \pm 1$, что при волнистости пятой гармоники $w_{(5)} = 0,05$ приводит к относительному значению разности э. д. с. секций в 2%.

В зависимости от значения суммы углов $n'(\alpha + \xi_{(n')})$, найденная разность постоянных составляющих э. д. с. изменяет свой знак. Если

$$-\frac{\pi}{2} < n'(\alpha + \xi_{(n')}) - 2k\pi < +\frac{\pi}{2},$$

где k — некоторое целое положительное число, то разность положительна, т. е. постоянная составляющая э. д. с. секции, в которую входит обмотка трансформатора, соединенная треуголь-

вом, выше э. д. с. другой секции, в которую входит обмотка, соединенная звездой.

Руководствуясь общей теорией [Л. 1, стр. 215 и 224—227], можем написать следующие уравнения для внешних характеристик отдельных секций:

$$U_{d\Delta} = E_{d\Delta} - \frac{3}{\pi} X_{a1} I_{d\Delta} \quad \text{и} \quad U_{d\lambda} = E_{d\lambda} - \frac{3}{\pi} X_{a1} I_{d\lambda},$$

где X_{a1} обозначает индуктивное сопротивление коммутации, взятое по отношению к анодному току, $I_{d\Delta}$ и $I_{d\lambda}$ — токи нагрузки секций, а $E_{d\Delta}$ и $E_{d\lambda}$ задаются уравнениями (7) и (8). У практически выполняемых трансформаторов сопротивление X_{a1} должно быть одинаково в обеих секциях⁴. Однако вследствие несовпадения значений $E_{d\Delta}$ и $E_{d\lambda}$ внешние характеристики обеих секций называются разными (рис. 4) и параллельная работа секций (рис. 1, а) затрудняется.

Гармоники э. д. с. преобразователя. Кривая э. д. с. каждой секции имеет шесть одинаковых пульсаций за период. Поэтому она содержит гармоники с порядковыми номерами

$$\nu = 6\lambda, \quad (10)$$

где λ принимает любое целое положительное значение.

Порядковые номера гармоник э. д. с. преобразователя, соответствующие четным значениям λ , обозначим через ν'' , а соответствующие нечетным — через ν' .

Каждая пульсация в кривой э. д. с. определяется уравнением (5) для секций с треугольником или уравнением (6) для секции со звездой. Эти уравнения должны быть взяты в пределах $\frac{\pi}{3} + \alpha$ до $\frac{2\pi}{3} + \alpha$. Произведя разложение э. д. с.

ряд гармоник, находим, что любая гармоника порядковым номером ν , содержащаяся в кривой э. д. с. отдельной секции, определяется следующими выражениями, справедливыми одновременно для выпрямительного и для инверторного режимов:

$$e_{d(\nu)\Delta} = E'_d [C_{(\nu)1} \sin \nu (\vartheta + \sigma_{(\nu)1}) + \sum_n C_{(\nu)n} \sin \nu (\vartheta + \sigma_{(\nu)n})], \quad (11)$$

$$e_{d(\nu)\lambda} = E'_d [C_{(\nu)1} \sin \nu (\vartheta + \frac{\pi}{6} + \sigma_{(\nu)1}) + + (-1)^\lambda \sum_n C_{(\nu)n} \sin \nu (\vartheta + \frac{\pi}{6} + \sigma_{(\nu)n})], \quad (11a)$$

$$C_{(\nu)1} = \frac{2}{\sqrt{2}-1} \cos \alpha \sqrt{1 + \nu^2 \tan^2 \alpha}, \quad (12)$$

⁴Выравнивание X_{a1} отдельных секций с обмотками трансформатора, соединенными звездой и треугольником, может быть достигнуто либо конструктивными средствами, либо введением дополнительной индуктивности.

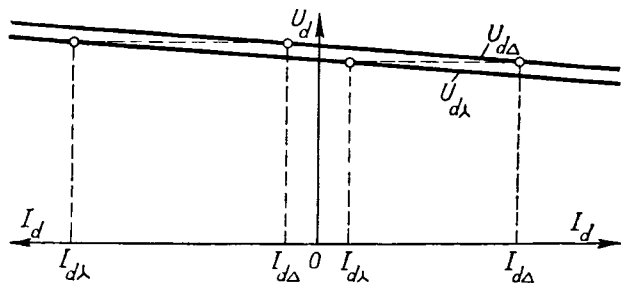


Рис. 4. Внешние характеристики отдельных секций преобразователя и распределение тока между ними при параллельном соединении секций.

$$\nu \sigma_{(\nu)1} = \arctg(\nu \operatorname{tg} \alpha) - \nu \alpha - \frac{\pi}{2}, \quad (13)$$

$$C_{(\nu)n} = w_{(n)} \frac{2n}{\nu^2 - n^2} \cos n(\alpha + \xi_{(n)}) \times \times \sqrt{1 + \frac{\nu^2}{n^2} \operatorname{tg}^2 n(\alpha + \xi_{(n)})}, \quad (14)$$

$$\nu \sigma_{(\nu)n} = \arctg \left[\frac{\nu}{n} \operatorname{tg} n(\alpha + \xi_{(n)}) \right] - \nu \alpha - \frac{\pi}{2}. \quad (15)$$

При отсутствии высших гармоник в кривой напряжения на стороне переменного тока уравнение (14) обращается в нуль, вследствие чего уравнения (11) и (11a) принимают тот вид, который соответствует строго синусоидальному напряжению переменного тока [Л. 2, стр. 129—132]. Интересно отметить, что уравнения (12) и (13) могут быть получены из уравнений (14) и (15), если считать, что $n = 1$, а $\xi_{(n)} = 0$.

На основании уравнений (11) и (11a), написанных относительно одного и того же начала отсчета углов ϑ (совпадающего с началом основной волны э. д. с. у обмотки, соединенной треугольником), можно определить, какие гармоники будут содержаться в э. д. с. всего преобразователя при последовательном и при параллельном соединении его секций.

Гармоника э. д. с. всего преобразователя

$$e_{p(\nu)} = e_{d(\nu)\Delta} + e_{d(\nu)\lambda},$$

если секции соединены последовательно, или

$$e_{d(\nu)} = \frac{1}{2} (e_{d(\nu)\Delta} + e_{d(\nu)\lambda}),$$

если секции соединены параллельно.

Произведя указанное сложение и учитывая тождество

$$\sin \nu \left(\frac{\pi}{6} + x \right) = \sin 6\lambda \left(\frac{\pi}{6} + x \right) = (-1)^\lambda \sin \nu x,$$

где x — любой произвольно заданный угол, получаем, что для гармоник с порядковыми номерами $\nu' = 6, 18, 30, 42$ и т. д., соответствующими нечетным λ ,

$$e_{d(\nu')} = E'_d \sum_{n'} C_{(\nu')n'} \sin \nu' (\vartheta + \sigma_{(\nu')n'}), \quad (16)$$

а для гармоник с порядковыми номерами $\nu''=21, 24, 36, 48$ и т. д., соответствующими четным λ ,

$$e_{d(\nu'')} = E_d [C_{(\nu'')} \sin \nu'' (\vartheta + \sigma_{(\nu'')}) + \sum_{n''} C_{(\nu'')n''} \sin \nu'' (\vartheta + \sigma_{(\nu'')n''})]. \quad (17)$$

В этих выражениях E_d — постоянная составляющая э. д. с. всего преобразователя (при последовательном соединении секций $E_d = 2E'_d$, а при параллельном $E_d = E'_d$).

Полученные выражения (16) и (17) определяют все гармоники, которые содержатся в кривой э. д. с. рассматриваемого преобразователя в общем случае при выпрямительном и при инверторном режимах, если напряжение сети переменного тока несинусоидально и содержит гармоники $n=6l \pm 1$. Анализируя полученные выражения, приходим к следующим выводам:

1. Если в сети переменного тока имеются гармоники $n'=5, 7, 17, 19$ и т. д., то э. д. с. всего преобразователя содержит не только гармоники ν'' , но и гармоники ν' , т. е. все гармоники ν , кратные шести [уравнение (10)].

Обстоятельство это объясняется тем, что гармоники ν' , содержащиеся в э. д. с. отдельных секций, в этом случае перестают быть одинаковыми и направленными друг другу навстречу.

2. Гармоники напряжения переменного тока n' , порождая в э. д. с. всего преобразователя гармоники ν' , не оказывают никакого влияния на гармоники ν'' , кратные 12 и имеющиеся при чисто синусоидальном напряжении переменного тока.

3. Гармоники напряжения переменного тока $n''=11, 13, 23, 25$ и т. д. оказывают влияние на величину и фазу только тех гармоник, содержащихся в э. д. с. всего преобразователя, которые кратны 12.

Величина и фаза дополнительно возникающих гармоник ν' полностью задается уравнениями (14), (15) и (16). Для частного случая, при котором в сети переменного тока имеется только одна гармоника n' , причем $\cos n'(\alpha + \xi_{(n')}) = \pm 1$, амплитуда дополнительных гармоник в э. д. с. преобразователя задается следующим простым уравнением:

$$E_{d(\nu')\text{ макс}} = \frac{2n'}{(\nu')^2 - (n')^2} w_{(n')} E_d.$$

Если, например, в сети переменного тока имеется гармоника $n'=5$ с волнистостью $w_{(5)} = 0,06$, то в э. д. с. всего преобразователя появляется гармоника $\nu'=6$, амплитуда которой может составлять 0,055 от постоянной составляющей E_d . Такую же примерно величину имеет амплитуда шестой гармоники в э. д. с. любого преобразователя с периодичностью $m=6$ при отсутствии регулирования ($\alpha=0$).

Начальная фаза линейных э. д. с. обмоток трансформатора, связанных с вентилями. Пусть θ_Δ и θ_λ — начальные фазы линейных э. д. с. тре-

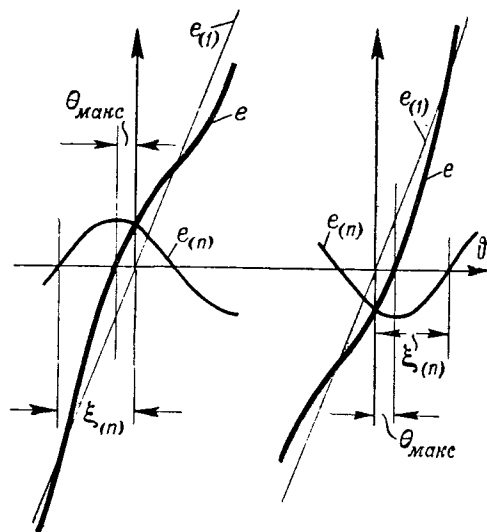


Рис. 5. Сдвиг начальной фазы э. д. с. на максимальную величину, вызванный одной гармоникой.

угольника и звезды, отсчитываемые от начальных волн этих э. д. с. Тогда по уравнениям (5) и (6) получаем, что

$$\sin \theta_\Delta + \sum w_{(n)} \sin n (\theta_\Delta + \xi_{(n)}) = 0,$$

$$\sin \theta_\lambda + (-1)^l \sum w_{(n)} \sin n (\theta_\lambda + \xi_{(n)}) = 0.$$

Эти уравнения позволяют графически найти θ_Δ и θ_λ при конечном числе гармоник с заданными $w_{(n)}$ и $\xi_{(n)}$.

Если начальные фазы всех гармоник равны нулю или π , то вполне очевидно, начальные фазы линейных э. д. с. θ_Δ и θ_λ также равны нулю, так что каждая линейная э. д. с. e_Δ и e_λ совпадает по фазе со своей основной волной.

Пусть в простейшем случае кривая линейной э. д. с. содержит кроме основной волны только одну гармонику. Можно доказать, что в этом случае наибольшее, могущее возникнуть значение начальной фазы линейной э. д. с.

$$\theta_{\text{макс}} = \arcsin w_{(n)},$$

откуда находим, что при $w_{(n)} = 0,05$ угол $\theta_{\text{макс}} = 3^\circ$. Как это понятно из рис. 5, относящего к рассматриваемому случаю наличия одной гармоники, угол θ принимает свое наибольшее значение $\theta_{\text{макс}}$, если в тот момент, когда гармоника проходит через амплитуду, основная волна принимает мгновенное значение, равное амплитуде гармоники, но обратное по знаку. Легко понять, что в этот момент кривая линейной э. д. с. проходит через нулевое значение.

Наличие гармоник n' в кривой напряжения переменного тока приводит к разному сдвигу начал у кривых линейных э. д. с. треугольника и звезды, ибо, как это было выяснено, назв-

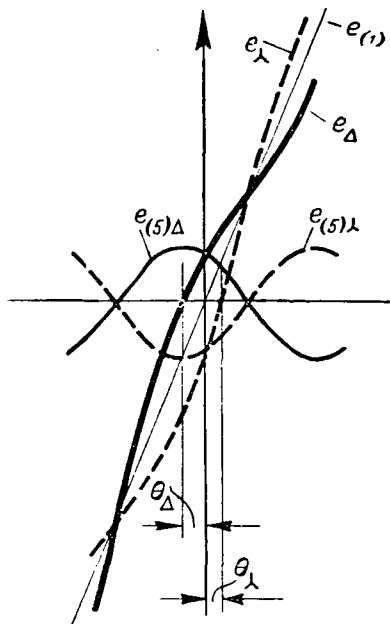


Рис. 6. Сдвиг начальной фазы линейных э. д. с. обмоток трансформатора, соединенных звездой и треугольником, вызванный одной гармоникой $n=5$ в напряжении переменного тока.

гармоники входят в эти э. д. с. с разными фазами. Обстоятельство это иллюстрирует рис. 6, где для наглядности кривые $e_λ$ и $e_Δ$ построены таким образом, что их основные фазы совпадают.

Как видно из рис. 6, начальные фазы $θ_Δ$ и $θ_λ$ имеют разные знаки и в общем случае не равны между собой по абсолютным значениям. Различие в начальных фазах $θ_λ$ и $θ_Δ$ при инверсном режиме приводит к увеличению угла погасания вентилей в одной секции и к уменьшению его в другой, что нежелательно, так как может нарушить нормальную работу преобразователя.

Углы коммутации. Рассмотрим влияние гармоник n' , содержащихся в кривой напряжения переменного тока, на величину углов коммутации в различных секциях преобразователя, функционирующего в таком режиме, когда коммутация, имеющая место в одной секции, не влияет на работу другой секции⁵.

Во время коммутации

$$2X_{aγ} \frac{di_a}{dθ} = e,$$

где e — линейная э. д. с. обмотки трансформатора, связанной с вентильми, а $X_{aγ}$ — индуктив-

ное сопротивление коммутации анодному току i_a . Из написанного уравнения следует, что

$$2X_{aγ} \int_0^{I_d} di_a = 2X_{aγ} I_d = \int_a^{a+γ} e dθ.$$

Подставляя вместо e выражения для $e_Δ$ и $e_λ$ из уравнений (5) и (6), находим после интегрирования, что

$$\begin{aligned} \cos(a + γ_Δ) + \sum \frac{1}{n} w_{(n)} \cos n(a + ξ_{(n)} + γ_Δ) = \\ = \cos a + \sum \frac{1}{n} w_{(n)} \cos n(a + ξ_{(n)}) - \frac{2X_{aγ} I_d}{V \sqrt{2E_{(1)}}} \end{aligned} \quad (18)$$

и

$$\begin{aligned} \cos(a + γ_λ) + (-1)^n \sum \frac{1}{n} w_{(n)} \cos n(a + ξ_{(n)} + γ_λ) = \\ = \cos a + (-1)^n \sum \frac{1}{n} w_{(n)} \cos n(a + ξ_{(n)}) - \frac{2X_{aγ} I_d}{V \sqrt{2E_{(1)}}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Из полученных уравнений видно, что наличие в сети переменного тока гармоник $n''=11, 13, 23, 25$ и т. д., у которых l — число четное, не влечет за собой неравенства между углами коммутации $γ_Δ$ и $γ_λ$. Что же касается гармоник $n'=5, 7, 17, 19$ и т. д., соответствующих l нечетному, то появление их в напряжении переменного тока вызывает неравенство между $γ_Δ$ и $γ_λ$, как это видно из нижеследующего примера.

Определим, пользуясь уравнениями (18) и (19), углы коммутации $γ_Δ$ и $γ_λ$ у преобразователя, работающего в инверторном режиме при $a=150^\circ$ и при $\frac{2X_{aγ} I_d}{V \sqrt{2E_{(1)}}} = 0,1$. Если напряжение сети пере-

менного тока синусоидально, то у каждой секции $\cos(150^\circ + γ) = \cos 150^\circ = -0,966$, откуда $γ_Δ = γ_λ = 15^\circ$. Если же в кривой напряжения переменного тока окажется кроме основной волны гармоника $n'=5$, для которой $w_{(5)}=0,1$, а $n(a + ξ_{(n)}) = 5(150^\circ + ξ_{(5)}) = k \cdot 360^\circ$, где попрежнему k — некоторое целое положительное число, то по уравнениям (18) и (19) получаем, что

$$\cos(150^\circ + γ_Δ) + 0,02 \cos 5γ_Δ = -0,946$$

и

$$\cos(150^\circ + γ_λ) - 0,02 \cos 5γ_λ = -0,986.$$

Графическое решение двух этих уравнений произведено на рис. 7, из которого видно, что угол коммутации $γ_Δ = 12,7^\circ$. Таким образом наличие пятой гармоники привело в секции с треугольником к уменьшению угла коммутации (и к увеличению времени погасания) на величину

$$γ - γ_Δ = 15^\circ - 12,7^\circ = 2,3^\circ.$$

⁵ При этом режиме численное значение углов коммутации не превосходит 30° , подобно тому как в случае реактивного преобразователя I (рис. 8) оно не превышает 60° [Л. 3].

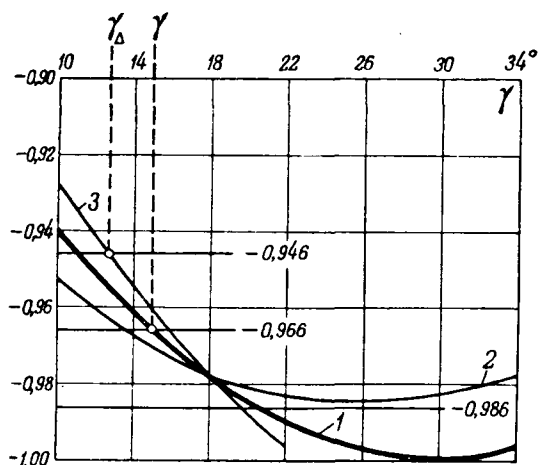


Рис. 7. Графический расчет углов коммутации при несинусоидальном напряжении переменного тока.

$$1 - \cos(150^\circ + \gamma); \quad 2 - \cos(150^\circ + \gamma) - 0,02 \cos 5\gamma \\ 3 - \cos(150^\circ + \gamma) + 0,02 \cos 5\gamma.$$

Что касается угла коммутации γ_Δ в другой секции, то, как видно из рис. 7, где кривая 2 не пересекает горизонтальную прямую с ординатой $-0,986$, угол γ_Δ возрастает настолько, что сумма углов $\alpha + \gamma_\Delta$ достигает 180° , и время погасания вентилей становится равным нулю, что неизбежно приводит к нарушению коммутации у инвертора.

Параллельная работа преобразователей с разной периодичностью: 6 и 12. Выше был произведен общий анализ работы преобразователя в выпрямительном и инверторном режимах при несинусоидальном напряжении сети переменного тока.

Обратимся к рассмотрению конкретного случая, приобретающего в настоящее время сугубо практическое значение в связи с внедрением игнитронных выпрямителей, долженствующих работать параллельно с ртутными выпрямителями. Пусть (рис. 8) к одной и той же сети переменного тока присоединены два преобразователя *I* и *II* с периодичностью 6 у первого и 12 у второго, работающих в выпрямительном режиме при угле регулирования $\alpha = 0$. Каждый из преобразователей имеет две секции, соединенные между собой параллельно через уравнивательный реактор. Ртутный преобразователь *I* выполнен по однократной, а игнитронный преобразователь *II* — по двухтактной схеме. Трансформаторы обоих преобразователей — трехобмоточные.

У преобразователя *I* в обеих секциях э. д. с. образуется за счет фазных напряжений трансформатора. Можно считать, что у одной секции образование э. д. с. происходит в положительной, а у другой секции — в отрицательной области одной и той же кривой напряжения, совпадающей по форме с кривой напряжения, приложенного к первичной обмотке трансформатора. Наличие нечетных гармоник в напряжении сети переменного тока не вызывает различия в форме у положительного и отрицательного участков этой кривой. Поэтому возникновение таких гар-

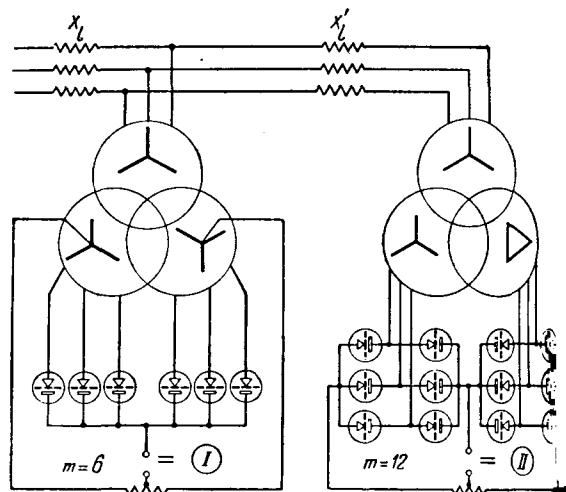


Рис. 8. Параллельное присоединение к сети переменного тока двух преобразователей: однократного *I* и двухтактного *II*, имеющих разные периодичности ($m=6$ и $m=12$).

моник в сети переменного тока в результате работы преобразователя *II* (или по другой причине) не нарушает одинакового характера условий функционирования обеих секций преобразователя *I*. Влияние преобразователя *II* на преобразователь *I*, будучи одинаковым для обеих секций *I*, повлечет за собой изменение кривой э. д. с., как это известно из вышеизложенного.

Рассмотрим влияние преобразователя *I*, имеющего сильно индуктивную нагрузку, на преобразователь *II* при его холостом ходе, пренебрегая при этом током холостого хода обоих трансформаторов. Преобразователь *I*, работая в выпрямительном режиме, забирает у сети переменного тока i , кривая которого показана на рис. 9. Этот ток, проходя по индуктивному сопротивлению X_l , представляющему собой эквивалентное сопротивление питающей системы, создает на нем падение напряжения u_{xl} , в результате чего напряжение u , приложенное к трансформатору, отличается от синусоиды. Можно доказать, что индуктивное падение напряжения

$$u_{xl} = \pm q \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{2} E_{(1)} \sin \theta, \quad (2)$$

где

$$q = \frac{X_l}{X_l + X_m}. \quad (2)$$

Под X_m понимается индуктивное сопротивление трансформатора, обусловленное потоками рассеяния. Уравнение (20) написано относительно начала каждой коммутации, в течение которой u_{xl} отлично от нуля; знак плюс соответствует здесь тем промежуткам, когда ток i нарастает.

Преобразователь *II* по условию находится в холостом ходе, и поэтому к его трансформатору приложено то же самое несинусоидальное напряжение u , что и к трансформатору преобразователя *I* (рис. 9). Фазные э. д. с. всех обмоток трансформатора, связанных с вентильными, у преобразователя *II* совпадают по форме кривой

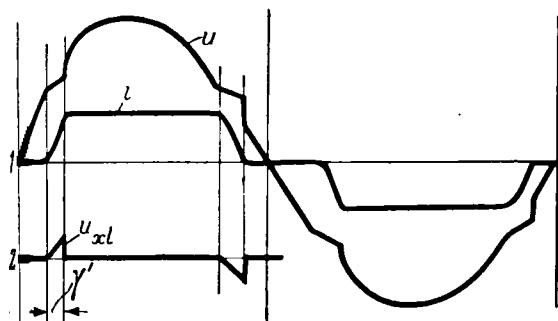


Рис. 9. Искажение напряжения переменного тока вследствие работы преобразователя с периодичностью $m=6$.

изменением напряжением сети u . Однако кривая линейной э. д. с. обмотки, связанной с вентилями и соединенной звездой, отличается по форме от кривой фазной э. д. с., а следовательно, и кривой линейной э. д. с. другой обмотки, связанной с вентилями и соединенной треугольником. Кривые сравниваемых линейных э. д. с. обмоток трансформатора преобразователя II показаны на оси I рис. 10. На этом же рисунке в 2) построены кривые э. д. с. отдельных секций преобразователя II, представляющие собой огибающую соответствующих линейных э. д. с. трансформатора.

До тех пор, пока угол коммутации γ' у преобразователя I меньше 30° , кривая э. д. с. $e_{d\Delta}$ секции, в которую входит треугольник, ничем не отличается от кривой, получающейся при синусоидальном напряжении переменного тока. Электродвижущая сила секции $e_{d\Delta}$ состоит из двух участков линейных э. д. с. e_{Δ} , которые искажены коммутациями, происходящими в преобразователе I.

Иначе обстоит дело с э. д. с. $e_{d\lambda}$ той секции, в которую входит звезда. В ней проявляются искажения при всех значениях угла коммутации γ' преобразователя I.

Указанное обстоятельство приводит к тому,

$$E_{d\Delta} > E_{d\lambda}.$$

Разность постоянных составляющих э. д. с. $\Delta E_d = E_{d\Delta} - E_{d\lambda}$ легко найти, если учесть, что в промежутке, измеряемом углом γ' , э. д. с. уменьшена как раз на величину индуктивного падения напряжения u_{x1} , задаваемого уравнением (20) (считаем, что коэффициент трансформации равен 1). Поэтому

$$= \frac{6}{2\pi} \int_0^{\gamma'} u_{x1} d\theta = \frac{6}{2\pi} \int_0^{\gamma'} q \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{2} E_{(1)} \sin \theta d\theta$$

$$\Delta E_d = \frac{1}{2} q \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} E_{(1)} (1 - \cos \gamma') = \frac{1}{2} q E'_d (1 - \cos \gamma'),$$

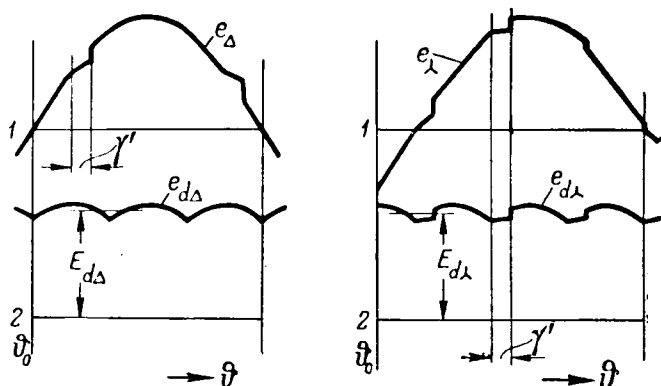


Рис. 10. Линейные э. д. с. обмоток трансформатора, соединенных треугольником и звездой, и э. д. с. отдельных секций двухфазного преобразователя. Искажения в кривых э. д. с. вызваны работой параллельно присоединенного однофазного преобразователя.

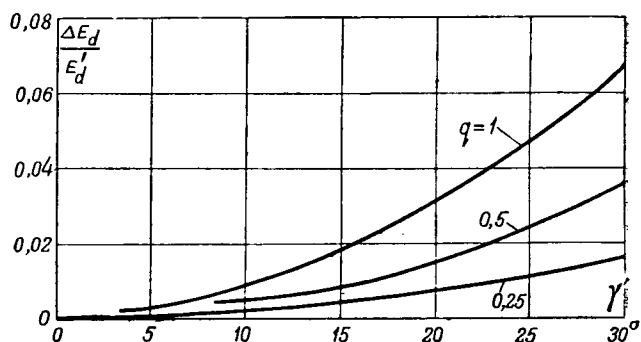


Рис. 11. Относительное значение разности постоянных составляющих э. д. с. секций двухфазного преобразователя вследствие работы параллельно присоединенного однофазного преобразователя с углом коммутации γ' .

откуда относительное значение разности э. д. с. секций

$$\frac{\Delta E_d}{E'_d} = \frac{1}{2} q (1 - \cos \gamma'). \quad (22)$$

По этому уравнению, справедливому при $\gamma' \leq 30^\circ$, на рис. 11 построены кривые для различных значений отношения индуктивностей q .

Распределение тока нагрузки между секциями преобразователя при их параллельном соединении. Как было выяснено выше, наличие в напряжении переменного тока гармоник n' , которые могут появиться, например, вследствие присоединения к сети преобразователя с периодичностью $m=6$, приводит к возникновению разности между постоянными составляющими э. д. с. отдельных секций исследуемого преобразователя и, как следствие этого, к расхождению их внешних характеристик (рис. 4).

При параллельном соединении секций (через уравнительный реактор) разность постоянных составляющих их напряжений не уравнивается, так как падение напряжения на индуктивном сопротивлении уравнительного реактора не может содержать постоянную составляющую. В результате при параллельном соединении

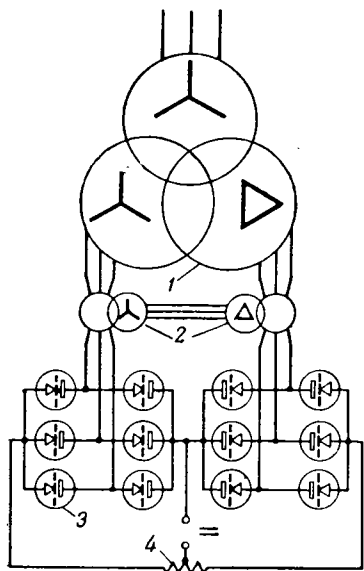


Рис. 12. Включение секционного делителя, состоящего из двух серийных трансформаторов, для обеспечения равномерного деления тока между секциями преобразователя.

1 — трансформатор; 2 — секционный делитель; 3 — вентиль; 4 — уравнильный реактор.

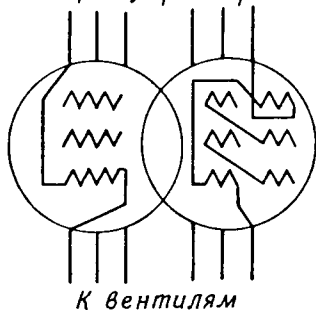
секций принудительно устанавливается напряжение

$$U_a = U_{a\Delta} = U_{a\lambda},$$

а токи секций $I_{a\Delta}$ и $I_{a\lambda}$ оказываются разными в соответствии с течением их внешних характеристик (рис. 4).

Неравномерное распределение тока нагрузки между параллельно соединенными секциями может возникнуть также и из-за некоторого, хотя и небольшого, различия в углах зажигания вентилей, принадлежащих разным секциям⁶.

К вторичным обмоткам трансформатора



К вентилям

Рис. 13. Секционный делитель в виде серийного трансформатора.

Неравномерное деление тока нагрузки помимо неравномерной загрузки вентилей и связанных с ними обмоток трансформатора приводит к на-

⁶ Явление это наблюдается также и при однофазной схеме 1, показанной на рис. 8. Оно может иметь место и при многоанодном вентиле [Л. 4, стр. 101—104].

сыщению сердечника уравнильного ре-
постоянным магнитным потоком, к иска-
формы кривых уравнильного тока и на-
токов вентилей.

В целях обеспечения равномерного д-
тока нагрузки между секциями рассмот-
преобразователя при выпрямительном и пр-
верторном режимах может быть применен
ционный делитель [Л. 5], представля-
собой серийный трансформатор, осущес-
щий трансформаторную связь между лини-
токама обмоток трансформатора, присоеди-
к вентилям⁷. Секционный делитель может
выполнен либо в виде двух двухобмот-
трансформаторов, вторичные обмотки ко-
будучи соединены у одного трансформ-
звездой, а у другого треугольником, вклю-
навстречу друг другу (рис. 12), либо у
одного трехобмоточного трансформатора
одна из обмоток соединена зигзагом (рис.
Такой характер соединения обмоток секци-
делителя объясняется тем, что выравни-
им линейные токи отдельных секций пре-
вателя сдвинуты между собой по фазе,
в свою очередь, является результатом р-
ных соединений обмоток преобразовате-
трансформатора, связанных с вентилями.

Если токи отдельных секций преобразова-
равны между собой, сумма н. с. на ка-
стержне секционного делителя равна нулю и
обмотках не индуктируются э. д. с. В проти-
случае сумма н. с. не будет равна нулю и
мотках секционного делителя возникнут э. д.
которые, добавляясь к напряжениям преоб-
вательного трансформатора, обеспечат вы-
нивание токов обеих секций.

Введение секционного делителя тока в с-
преобразователя обеспечивает необходимое
номерное распределение общего тока нагр-
между отдельными секциями как в случае
чия гармоник в сети переменного тока (пе-
тельная работа преобразователей с перио-
дичностью $m=6$ и $m=12$), так и при неболь-
всегда возможных, отклонениях в углах за-
гания отдельных вентилей.

Следует считать, что введение секцион-
делителя тока полезно не только для расс-
ренной двухтактной схемы параллельного
но и для других схем, в которых осуществ-
параллельное соединение секций, особенно,
преобразователи, выполненные по этим схе-
работают с сеточным управлением. Тип
мощность секционного делителя составляет 2-
от типовой мощности преобразовательного тр-
форматора.

Выводы. 1. Высшие гармоники, содержа-
в кривой напряжения переменного тока, ока-
вают влияние на постоянную и переменную

⁷ Возможно получить равномерное деление тока
грузки между секциями также и путем уменьши-
э. д. с. секции, у которой она (э. д. с.) больше, при
сеточное регулирование. Однако это нецелесообраз-
практических случаях, поскольку разность постоян-
составляющих э. д. с. секций обычно не сохраняется
бильной.

яющие э. д. с. ионных преобразователей, а также на углы коммутации и погасания вентилей. Изменение постоянной составляющей э. д. с. имеет существенное значение при параллельном соединении нескольких преобразователей или отдельных секций одного преобразователя, если в них гармоники в напряжении переменного тока оказывают различное влияние на э. д. с. преобразователей или секций. Изменение переменной составляющей э. д. с. имеет значение при любом соединении отдельных преобразователей или секций одного преобразователя. При этом надо учитывать, что высшие гармоники в напряжении переменного тока могут вызвать не только изменение тех гармоник э. д. с. преобразователя, которые имеются и при номинальном напряжении переменного тока, но и породить новые гармоники. Изменение углов коммутации и погасания вентилей, происходящее вследствие наличия гармоник в напряжении переменного тока, необходимо учитывать при инверторном режиме работы преобразователя, когда такое изменение может привести к нарушению правильной коммутации. В случае двухтактного преобразователя, состоящего из двух секций, соединенных параллельно последовательно (рис. 1), наличие в напряжении переменного тока нечетных гармоник 7, 17, 19 и т. д. приводит к тому, что э. д. с. и внешние характеристики секций, а также углы коммутации и погасания вентилей будут различными в разных секциях; гармоники э. д. с. отдельных секций $\nu' = 6, 18, 30$ не перестают быть одинаковыми и направ-

ленными навстречу друг другу, вследствие чего э. д. с. всего преобразователя содержит не только гармоники, кратные 12, но все гармоники, кратные 6.

3. Наличие в напряжении переменного тока высших гармоник $n'' = 11, 13, 23, 25$ и т. д. не может привести к нарушению идентичности в работе отдельных секций рассматриваемого двухтактного преобразователя.

4. Неправильное деление тока нагрузки между параллельно включенными секциями двухтактного преобразователя (рис. 1, а), возникающее как вследствие наличия гармоник $n' = 5, 7, 17, 19$ и т. д. в сети переменного тока, так и из-за разброса в углах зажигания вентилей, может быть ликвидировано при помощи секционного делителя (рис. 12, 13), который осуществляет специальную трансформаторную связь между линейными токами обмоток трансформатора, присоединенных к вентилям.

Литература

1. Б. М. Шляпошников. Игнитронные выпрямители. Трансжелдориздат, стр. 735, 1947.
2. Б. М. Шляпошников. Элементы теории выпрямительных схем с ионными преобразователями, ч. III, стеклогр. Изд. Ленинградского политехнического института им. Калинина, стр. 262, 1940.
3. М. П. Костенко, Л. Р. Нейман и Г. Н. Блазевич. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками. Изд. Академии наук СССР, стр. 106, 1946.
4. М. А. Чернышев. Инвертирование тока на тяговых подстанциях. Трансжелдориздат, стр. 251, 1950.
5. Б. М. Шляпошников и А. В. Поссе. Многофазный выпрямитель, авторские свидетельства СССР № 83475 и 89291, 1950.

[8. 6. 1951]



Комплектные распределительные устройства для промпредприятий

Инж. А. А. ЕРМИЛОВ

Центроэлектромонтаж

Последние годы в СССР накоплен значительный опыт проектирования и изготовления комплектных распределительных устройств. Разработанные серии и опытные образцы в эксплуатации пробные партии различных комплектных распределительных устройств; некоторые уже длительное время находятся в эксплуатации. На очереди стоит вопрос о массовом изготовлении комплектных распределительных устройств. В связи с этим назрела настоятельная потребность всестороннего изучения имеющихся конструкций и обобщения накопленного опыта.

Подводятся итоги развития комплектных распределительных устройств в Советском Союзе. Даются классификация и оценка существующих конструкций комплектных распределительных устройств и намечаются пути дальнейшего их улучшения. Ориентировочно определяются области применения некоторых типов комплектных распределительных устройств. Печатается в порядке обсуждения.

В настоящее время определились два вида комплектных распределительных устройств, на которых должно быть сосредоточено внимание.

Первый вид — выкатные комплектные распределительные устройства. Их массовое производство целесообразно развивать главным образом на электроаппаратостроительных заводах.

Второй вид — стационарные комплектные распределительные устройства. Как показала практика, производство комплектных распределительных устройств этого вида может быть без затруднений и на высоком техническом уровне налажено в надлежащем образом оборудованных производственных пред-

приятнях электромонтажных организаций и даже в крупных приобъектных мастерских на монтаже.

В отношении стационарных комплектных распредустройств основное внимание должно быть обращено на дальнейшее снижение габаритов и весов их камер, а также улучшение эксплуатационных показателей. Этого можно достигнуть путем модернизации и приспособления встраиваемой в них аппаратуры. Широкое применение должны получить малогабаритные стационарные камеры высокого напряжения с выключателями нагрузки и предохранителями.

Комплектные распредустройства обоих видов одинаково успешно разрешают задачу индустриализации электромонтажных работ. Применение выкатных распредустройств, кроме того, позволяет повысить удобство, надежность и безопасность эксплуатации. Последнее достигается благодаря компактности этих распредустройств, надежному закрытию токоведущих частей для защиты от прикосновения и соответствующим уплотнениям для предотвращения чрезмерного запыления, благодаря надежной изоляции токоведущих частей и контактных соединений, а также возможности быстрой замены основного поврежденного элемента — выключателя — путем его выкатки для ремонта и ревизии на специальном стенде в удобных и совершенно безопасных условиях.

Классификация комплектных распредустройств, необходимых для электроустановок промпредприятий, по разрывной мощности, напряжению и току приведена в таблице.

Тип	Разрывная мощность, тыс. квз	Номинальное напряжение, кв	Номинальный ток, а
А. С выключателями нагрузки и предохранителями			
I	до 200	3...10	50...400
Б. С автоматическими выключателями			
II	100	3...10	200...600
III	200...300	3...10	400...1500
IV	500	6...10	600...2000
V	500	35	600

Комплектные распредустройства I типа целесообразно изготовлять только в стационарном исполнении. Все остальные могут иметь как выкатное, так и стационарное исполнение.

Основными параметрами каждого типа комплектных распредустройств должны явиться номинальное напряжение и предельная разрывная мощность. Для облегчения взаимозаменяемости ячеек и максимальной их унификации шкала номинальных токов не должна быть чрезмерно развинутой.

Комплектные распредустройства должны изготовляться преимущественно с одиночной системой шин. Это соответствует современным тенденциям к разукрупнению подстанций промпредприятий и к максимальному упрощению их схем. Опыт эксплуатации показывает, что применение

одиночной системы шин не понижает надежности и бесперебойности электроснабжения, простота схемы сводит к минимуму вероятность ошибочных манипуляций с коммутационными аппаратами. В мощных комплектных устройствах относящихся к IV и V типам, в которых случаях целесообразно применить систему шин.

В комплектное распредустройство входят все элементы обычных схем электрических соединений: 1) ввод, 2) отходящая линия, 3) трансформатор напряжения; 4) линия от трансформатора к реакторному и автотрансформаторному запуску; 5) аппарат для секционирования шин (выключатель, разъединитель) и т.д., являющиеся комбинациями из перечисленных элементов.

Требования к защите, измерениям и электроэнергии в комплектных распредустройствах принципиально те же, что и в обычных распредустройствах, однако в отношении защиты, особенно в стационарных комплектных распредустройствах, следует стремиться к наиболее простым решениям, не требующим специальных устройств, независимого источника оперативного тока и т.д. как устройство последнего в ряде случаев труднительно и совершенно нецелесообразно.

В настоящее время достаточно четко сложились основные принципы конструирования комплектных распредустройств как выкатных, стационарных.

Основным требованием к выкатным комплектным распредустройствам является взаимозаменяемость их выдвижных частей. Только возможность быстрой и легкой замены любого элемента может в какой-то мере оправдать усложнения, которые связаны с изготовлением этих распредустройств.

Включение резервной выкатной части ячейки должно осуществляться без подрегулировки, переключения вторичных цепей и наладки защиты. Это означает, что каждая ячейка должна быть изготовлена достаточно просто и иметь в выкатной части минимум аппаратуры и приборов, из которых в ней должен находиться только выключатель со своим приводом. Трансформаторы тока, измерительные приборы, счетчики и реле остаются в неподвижной части ячейки. В настоящее время в Советском Союзе все выкатные комплектные распредустройства конструируются по такому принципу.

Как нетрудно убедиться из рассмотренных типов выкатных комплектных распредустройств, все необходимые в эксплуатации операции, регулировки и наладки защиты и т.д. могут быть произведены при наличии реле в неподвижной части камеры высокого напряжения. Измерительные приборы также предпочтительно устанавливать в стационарной части распредустройства. Что касается счетчиков, то неподвижная их установка диктуется правилами устройства электрических установок.

Размещение трансформаторов тока в неподвижной части камеры при одностороннем

пении последней приводило к затруднениям в испытании защиты первичным током. Однако в настоящее время эти затруднения преодолены. В последних конструкциях камер с односторонним обслуживанием предусмотрена возможность защиты первичным током без снятия напряжения со сборных шин. Нагрузочный трансформатор может быть включен без отсоединения кабеля.

Лишь при применении реле прямого действия, баки непосредственно в привод выключателя, получает некоторое преимущество вариант выкатки трансформаторов тока, так как при этом не имеет места нежелательный разрыв токовых цепей вторичной коммутации. Однако из-за затруднения в отношении взаимозаменяемости и кроме того такая защита имеет место преимущественно лишь на малых подстанциях, где применение дорогих комплектных распределительных устройств выкатного типа целесообразно и следует применять стационарные.

Во всех выпускаемых и запроектированных в Советском Союзе комплектных распределительных устройствах принят горизонтально-подвижный способ выкатки выключателей с индивидуальными тележками для каждого выключателя.

Вывод и выкатывание тележки осуществляется с помощью особого механизма. Тележка имеет два фиксированных положения: рабочее и контрольное. В рабочем положении электрически соединены все аппараты первичной и все аппараты вторичной схемы коммутации независимо от того, в подвижной или неподвижной части находятся. В контрольном положении аппараты первичной схемы коммутации разобщены. Также управления и сигнализации привода выключателя остаются соединенными с соответствующими цепями в неподвижной части камеры. Это делает возможным опробование выключателя при помощи ключа управления и отключения, а также опробование сигнализации.

При соединении цепей первичной коммутации являются втычные контакты штепсельного типа в неподвижном положении ножей (или стержней) в подвижной части. Цепи вторичной коммутации соединяются при помощи специальных подвижных контактов. Выкатная часть присоединяется к заземляющей магистрали через скользящий контакт.

Горизонтально-подвижный способ выкатки приспособлен для выключателей отечественного производства, значительно проще в конструкции и удобнее в эксплуатационном отношении, чем распространенный в США способ опускания опускаемыми выключателями для них тележкой. Опыт эксплуатации выкатного распределительного устройства завода «Электроаппарат» с вертикальным подъемом бака показал, что эксплуатационные неудобства этого способа. Для подъема или опускания выключателя тележку приходится проделывать всевозможные повороты рукоятки со значительными усилиями к концу подъема, что

увеличивает время, потребное для замены выключателя.

В стационарных комплектных распределительных устройствах основные элементы коммутационных аппаратов должны быстро и легко взаимозаменяться. К этим элементам относятся: баки выключателя ВМГ-133, гасительные камеры и направляющие устройства выключателя ВГ-10, гасительные камеры выключателя нагрузки ВНП-16, трубки предохранителя типа ПК.

Взаимозаменяемость, без которой невозможно быстро ввести обратно в работу поврежденную ячейку, может быть достигнута посредством точности изготовления аппарата, а также упрощения способа крепления перечисленных элементов к раме аппарата или к поддерживающей конструкции. Конструктивное выполнение ячейки и взаимное расположение аппаратов в ней также должны способствовать быстрой замене указанных элементов аппарата.

Конструкция комплектных распределительных устройств должна обеспечивать достаточную и безопасную обзорность и доступность оборудования без снятия напряжения со сборных шин.

При выкатке выключателя, сухой разделке кабелей и сплошной изоляции шин требования к обзорности и доступности распределительных устройств становятся принципиально иными.

Промышленностью должны изготавливаться комплектные распределительные устройства с двусторонним и с односторонним обслуживанием. Последние имеют значительные экономические преимущества и удобства в отношении общей компоновки подстанций, особенно небольшой и средней мощности. Совершенно очевидно, что на промпредприятиях стационарные комплектные распределительные устройства будут применяться преимущественно с односторонним обслуживанием, так как практика эксплуатации показала их полную пригодность с точки зрения обзорности, доступности оборудования и удобства обслуживания.

Стационарные распределительные устройства с двусторонним обслуживанием будут применяться лишь на крупных и ответственных подстанциях, а также на подстанциях, от которых отходят преимущественно воздушные линии. Применение этих распределительных устройств в последнем случае при соответствующем конструктивном выполнении их имеет значительные удобства с точки зрения вывода воздушных линий.

В выкатных распределительных устройствах с односторонним обслуживанием наблюдение за выключателем и уровнем масла в нем может быть достаточно удобно осуществлено при включенном положении выключателя через смотровые отверстия в фасаде камеры. Для этой цели в камере предусматривается лампа, замена которой может быть произведена с фасада камеры. Расположение привода выключателя таково, что его внешний осмотр возможно осуществить как при включенном, так и выключенном положении выключателя, без выкатки последнего.

Однако выкатные распределительные устройства с односторонним обслуживанием имеют существенный недостаток, который заключается в том, что

осмотр кабельных муфт, трансформаторов тока, втычных контактов, а в некоторых типах и сборных шин возможен лишь после очередной выкатки выключателей и захода в камеру, так как видимость этих элементов схемы из коридора обслуживания недостаточна.

По этой причине выкатные распреустройства с односторонним обслуживанием, в первый период их освоения, следует применять или в менее ответственных установках, допускающих снятие напряжения со сборных шин, или же в секционированных распреустройствах, в которых осмотры могут производиться при отключении одной из секций и переводе питания основных потребителей на другую секцию.

Накопление опыта эксплуатации и улучшение исполнения комплектных распреустройств (изоляция ошиновки, надежная сухая разделка кабелей, сухие трансформаторы тока, надежное выполнение втычных контактов), несомненно, позволят в дальнейшем расширить область применения выкатных распреустройств с односторонним обслуживанием или быть может даже полностью перейти на этот тип. Этому, несомненно, будет способствовать удачное решение вопроса об испытании защиты первичным током.

Выкатные распреустройства с двусторонним обслуживанием при надлежащем их выполнении делают возможным удобный осмотр всего оборудования камер под нагрузкой. Областью их применения являются ответственные электроустановки, а также все другие случаи, когда их установка не встречает затруднений при общей компоновке подстанции. Наиболее рациональным следует считать комплектные распреустройства, позволяющие осуществлять и двустороннее и одностороннее обслуживание.

В выкатных распреустройствах предусматриваются простейшие механические блокировки, предотвращающие: 1) выкатывание тележки из рабочего положения и вкатывание ее за контрольное положение при включенном выключателе; 2) включение выключателя при нахождении тележки между рабочим и контрольным положениями, при перемещении ее с помощью механизма вкатывания; 3) вкатывание тележки при включенном выключателе на расстояние, при котором не обеспечиваются установленные значения разрядных напряжений между разомкнутыми втычными контактами. Последняя блокировка (п. 3) обеспечивает безопасность производства работ и предотвращает перекрытия между вторичными контактами при перенапряжениях.

В стационарных распреустройствах основной является блокировка между выключателями и разъединителями, не разрешающая манипуляции последними при включенном выключателе. Могут быть предусмотрены также блокировки, не разрешающие открытие дверей отсека выключателя под напряжением и отсека линейного разъединителя до наложения заземления.

Сборные шины, ответвления от них и места контактных соединений выкатных распреустройств должны быть изолированы по всей длине при помощи твердой, теплостойкой и дуго-

стойкой изоляции, накладываемой на фазу. Сплошную изоляцию камеры комплектной рекомендовать не следует. До надежной теплостойкой и дугостойкой комплектные распреустройства выпущены с голой ошиновкой.

Изоляция токоведущих частей и других элементов комплектных распреустройств по безопасности обслуживания, надежность и уменьшает размеры камер. Последнее имеет существенное значение для общей компоновки подстанции, транспортировки камер, уменьшения ширины коридора и сокращения производственных площадей на заводе-изготовителе.

Пофазная изоляция токоведущих предъявляет особо строгие требования к чистоте всех контактных соединений. Контактные поверхности должны быть тщательно обработаны и иметь антикоррозийные покрытия (поцинковка, серебрение). Необходимо предпринять надежные меры против самоотвинчивания болтовых соединений и т. п.

Чтобы обеспечить возможность осмотра контактов, изоляция в местах контактных соединений должна быть съемной, изготовленной из, например, специальных коробок из пластика или другого материала, заполненных изоляционным компаундом.

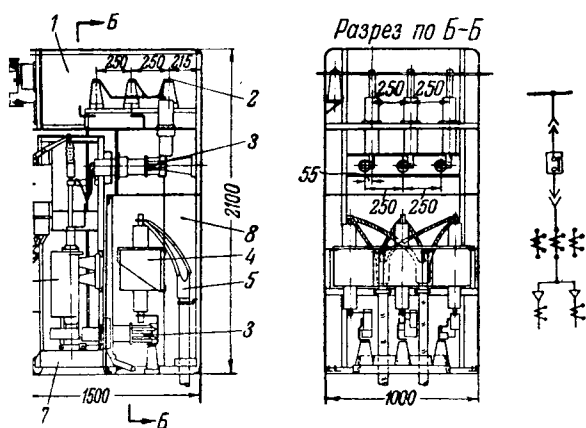
Большое внимание следует обратить на тщательное и надежное выполнение втычных контактов, так как они трудно доступны для осмотра даже при выкатенной тележке. Гнезда контактов должны располагаться на выдвижной части, позволяющей получить возможность удобной их ревизии при монтаже.

Трансформаторы напряжения, как правило, целесообразно совмещать с другими простейшими ответвлениями: ввод без выключателя, рядник и т. п. В выкатных распреустройствах трансформаторы напряжения должны быть снабжены втычными контактами и выдвигаться из ячейки по специальным направляющим или выкатываться на тележке вместе с другими аппаратами, расположенными в данной ячейке, отдельно от них.

Измерительные приборы и реле в выкатных комплектных распреустройствах устанавливаются в специально для них предусмотренных отсеках или на открывающейся двери камеры. Последний способ размещения дает возможность увеличить число устанавливаемых приборов и уменьшить габариты камеры.

К аппаратуре комплектных распреустройств, особенно выкатного типа, предъявляется ряд специальных требований. Она должна быть приспособлена для встройки в камеры и обладать высокой степенью надежности.

В комплектных распреустройствах, предназначенных для внутренней установки, следует применять преимущественно безмасляные, а в первом этапе освоения маломасляные выключатели. В распреустройствах же для наружной установки целесообразно применение и баковых масляных выключателей.



Выкатное комплектное распределительное устройство завода «Электроштит» с выключателем ВМГ-133.

1 — шинная камера; 2 — сборные шины; 3 — штепсельный разъединитель; 4 — трансформатор тока; 5 — кабельная разделка; 6 — масляный выключатель ВМГ-133; 7 — выкатная часть; 8 — шкаф; 9 — соленоидный привод; 10 — отсек реле и измерительных приборов.

новым типом привода должен быть ручным автоматическим отключением. Однако нецелесообразно разрабатывать комплектные распределительные устройства с дистанционным управлением для применения их главным образом в тех случаях, когда имеются элементы автоматики (АПВ), а также и для некоторых линий, питающих электродвигатели. Чтобы избежать покупки аккумуляторных батарей, питание катушек соленоидных приводов следует производить от индивидуальных для каждой линии или общих для всего распределительного устройства выпрямителей. Ввиду этого ток включения соленоидных приводов должен быть уменьшен в соответствии с током существующих приводов.

На первом этапе освоения комплектных распределительных устройств из выпускаемых ныне выключателей могут быть использованы: а) для наружной установки — баковые выключатели ВМ-35 и ВМ-10, горшковые МГ-35 и ВМГ-133; б) для внутренней установки ВМГ-133; ВМБ-10, МГ-40, а также электромагнитный выключатель (на базе МГ-10) при условии доработки последнего в направлении наилучшего приспособления для комплектных распределительных устройств. Можно также рассмотреть вопрос о применении малогабаритного воздушного выключателя низкого давления с давлением до 10 кВ, разработанного ВЭИ, если потребуется сложный компрессорный хозяй-

ственный предохранитель, применяемые в комплектных распределительных устройствах I типа (см. таблицу), должны при срабатывании давать импульс на отключение выключателя нагрузки. В начальной стадии эксплуатации комплектных распределительных устройств можно применить выключатель нагрузки типа

В комплектных распределительных устройствах следует применять сухие малогабаритные трансформаторы опорного типа и компактные сухие трансформаторы напряжения с предохранителями на выходящих контактах. Желательно, чтобы измерительные приборы и реле были утопленного типа и имели прямоугольную форму.

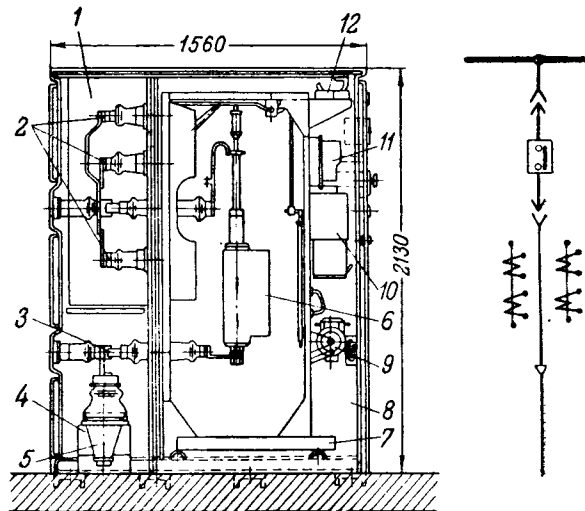


Рис. 2. Выкатное комплектное распределительное устройство ОКБ КРУ МЭП с выключателем ВМГ-133.

1 — шинная камера; 2 — сборные шины; 3 — штепсельный разъединитель; 4 — трансформатор тока ТФФ-10; 5 — кабельная разделка; 6 — масляный выключатель ВМГ-133; 7 — выкатная часть; 8 — шкаф; 9 — механизм выкатывания; 10 — соленоидный привод ПС-10; 11 — контактор; 12 — низковольтные контакты.

Для стационарных распределительных устройств необходимо изготовить модернизированные малогабаритные разъединители. В комплектных распределительных устройствах для внутренней установки должна быть применена сухая разделка кабелей, но с возможностью также размещения обычных кабельных воронок.

В настоящее время в Советском Союзе освоены три типа выкатных комплектных распределительных устройств 6 и 10 кВ. Некоторые из них уже находятся в эксплуатации, а остальные в стадии монтажа. У всех них выкатывается только выключатель. Трансформаторы же тока, приборы и реле располагаются в неподвижной части камеры.

Комплектное распределительное устройство завода «Электроштит» (рис. 1) рассчитано на двустороннее и одностороннее обслуживание. Все элементы схемы при двустороннем обслуживании обозреваемы без снятия напряжения и хорошо доступны. При одностороннем обслуживании доступность и обозреваемость также обеспечены удовлетворительно, без снятия напряжения со сборных шин, но только после выкатки выключателей. Как при двустороннем, так и одностороннем обслуживании сборные шины обозреваемы под напряжением и доступны для ревизии и ремонта без выкатки выключателей из камер, но при условии, что выкатные части камер вводов от источника питания будут приведены в положение опробования (контрольное). Удовлетворительно решена задача опробования защиты первичным током даже при одностороннем обслуживании. Высота размещения кабельной муфты позволяет обойтись без кабельного приямка, что представляет удобство при размещении распределительного устройства в верхнем этаже или над подвалом. Камеры достаточно компактны, несмотря на применение оборудования, не приспособленного для комплектных распределительных устройств.

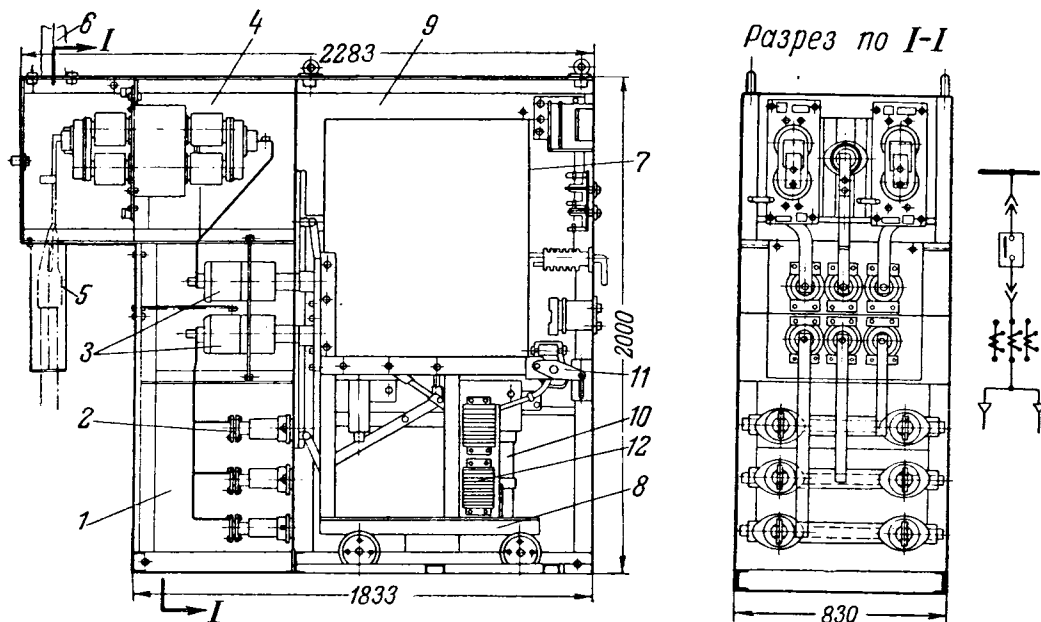


Рис. 3. Выкатное комплектное распределительное устройство ОКБ КРУ МЭП с выключателем ВЭМГ-10. 1 — шинная камера; 2 — сборные шины; 3 — штепсельный разъединитель; 4 — трансформаторы тока; 5 — кабельная разделка; 6 — вариант вывода кабеля вверх; 7 — электромагнитный выключатель ВЭМГ-10; 8 — выкатная часть; 9 — шкаф; 10 — соленоидный провод; 11 — механизм вкатывания; 12 — контакты вторичной коммутации.

В комплектном распределительном устройстве ОКБ КРУ МЭП с выключателем ВМГ-133 (рис. 2) вследствие размещения сборных шин сзади практически исключается возможность одностороннего обслуживания. Размещение кабельной муфты и трансформаторов защиты от замыканий на землю в самом низу требует сооружения под каждой камерой кабельного приемка и, следовательно, затрудняет размещение распределительного устройства в

верхнем этаже или над подвалом. Реле и релейные приборы размещены на открывающейся дверце. Применены специальные трансформаторы тока опорного типа.

Другая конструкция ОКБ КРУ МЭП с выключателем ВЭМГ-10 (рис. 3) также исключает возможность одностороннего обслуживания вследствие неудачного размещения сборных шин. Доступ к шинам затруднен даже и при двустороннем обслуживании. Слишком большая ширина выкатной части (1833 мм) приводит к уменьшению ширины коридора управления. Кроме того, следует отметить меньшую разрывную мощность выключателя ВЭМГ-10 по сравнению с ВМГ-133 и меньшую стойкость к перенапряжениям (пониженное испытательное напряжение). Кроме описанных конструкций ОКБ КРУ в последнее время разработано компоновку, логичную приведенной на рис. 1.

Главэлектромонтажом разработаны три типа камер стационарных комплектных распределительных устройств. Бескарасная камера из гнутой листовой стали (рис. 4), разработанная Севзапэлектромонтажом, полностью отвечает требованиям, предъявляемым к комплектным распределительным устройствам, и приспособлена к массовому водному изготовлению. Малогабаритность, компактное расположение аппаратуры, технологичность конструкции и хороший внешний вид хорошо отличают эти камеры от первоначально так называемых «сборных» камер.

В настоящее время организовано серийное производство камер Севзапэлектромонтажа. Сготавливаются в двух вариантах: 1) со сплошными ограждениями всех токоведущих частей аппаратов; 2) с сетчатыми (или смешанными) ограждениями фасадов и неогражденными сборными шинами и токоведущими частями. Первый вариант предназначен для установки в про-

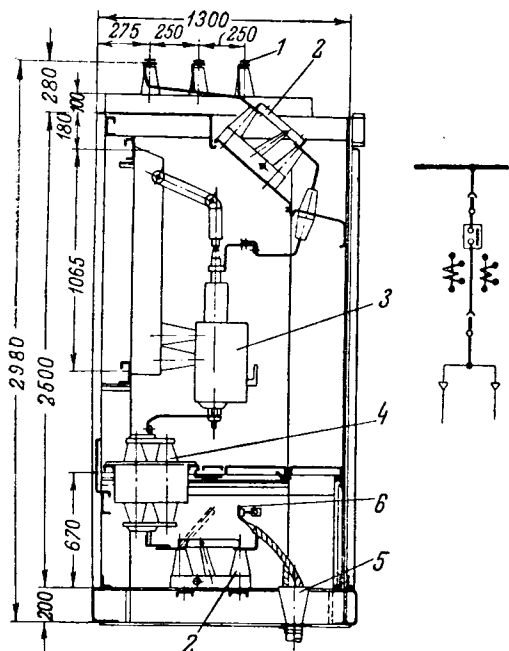


Рис. 4. Стационарное комплектное распределительное устройство, разработанное Севзапэлектромонтажом.

1 — сборные шины; 2 — разъединитель; 3 — масляный выключатель ВМГ-133; 4 — трансформаторы тока; 5 — кабельная воронка; 6 — скоска к линейному разъединителю для наложения заземления.

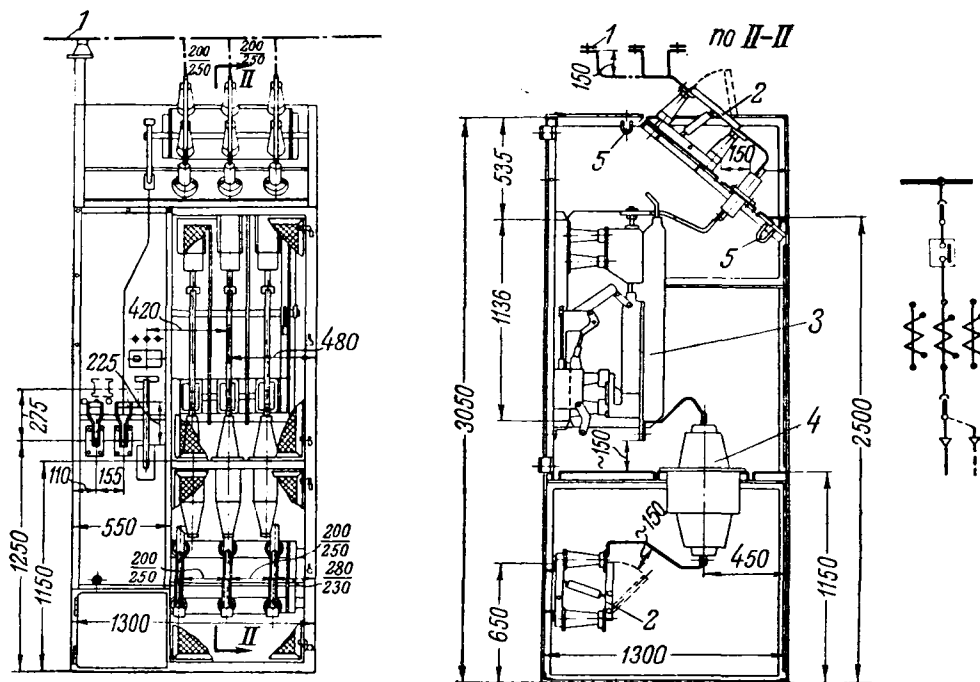


Рис. 5. Стационарное комплектное распределительное устройство Московского проектно-конструкторского управления Центроэлектромонтажа.

1 — сборные шины; 2 — разъединитель; 3 — автогазовый выключатель ВГ-10; 4 — трансформаторы тока; 5 — кольцо для подъема выключателя.

твенных помещениях, в которые имеет доступ неинструктированный персонал, второй — установки на подстанциях и электромашинопомещениях. Камеры во втором исполнении выше и несколько меньше по габаритам.

Камера, разработанная Московским проектно-конструкторским управлением Центроэлектромонтажа (рис. 5), также рассчитана на массовое применение, но она более приспособлена к изготовлению в приборных мастерских электротехнических организаций. Габариты этой камеры в 1,5 раза больше камер Севзапэлектромонтажа. Малогабаритные камеры Севзапэлектромонтажа с выключателями нагрузки типа ВМП-16 отличаются большой компактностью. По своим размерам они в 2,7...3,1 раза меньше камер с большими выключателями.

Сравнение выкатных и стационарных комплектных распределительных устройств показывает, что занимаемой площади они примерно равноценны. Площадь, занимаемая камерой первого вида, колеблется в пределах 1,5...1,89 м², второго 1,69...1,75 м². Стационарные распределительные устройства выше выкатных, это в ряде случаев не сказывается на их размещении. Зато ширина коридора в случае применения выкатных распределительных устройств получается больше на 1...1,5 м. Следовательно, кубатура помещения, которое требуется для выкатных распределительных устройств, как правило, не будет меньше кубатуры для стационарных распределительных устройств.

При решении вопроса о разграничении области применения выкатных и стационарных распределительных устройств следует прежде всего учитывать обстоятельство, что в настоящее время еще не налажен массовый выпуск ни тех, ни других и

что существующая аппаратура больше приспособлена к стационарным распределительным устройствам.

Ввиду большой потребности в комплектных распределительных устройствах сейчас следует развивать в равной степени и стационарные и выкатные распределительные устройства. Практика применения покажет жизнеспособность и наибольшую пригодность их в тех или иных условиях работы и поможет более отчетливо очертить область применения.

Однако, исходя из четко определившихся прогрессивных методов электроснабжения промышленных предприятий и требований к высоковольтным аппаратам, можно уже сейчас в порядке первого приближения сказать, что выкатные распределительные устройства должны преимущественно применяться в тех случаях, когда число ячеек не менее 10...15 или даже 20. При меньшем числе ячеек становится нерентабельным иметь на каждой подстанции резервные выкатные части и инспекционное устройство для ревизии выключателей. Если же иметь одно инспекционное устройство и общую резервную тележку на несколько малых подстанций, то время замены значительно увеличится и в ряде случаев не будет меньше времени замены или ремонта некоторых элементов в стационарных распределительных устройствах.

Выкатные распределительные устройства будут устанавливаться в первую очередь в машинных залах, на коммутационных пунктах или в распределительных устройствах вторичного напряжения главных понижающих подстанций, на крупных цеховых подстанциях, в компрессорных и т. п.

Для ориентировочной оценки потребности в выкатных распределительных устройствах можно предпо-

ложить, что не менее 50% общего числа ячеек, которые будут оборудованы на промпредприятиях в ближайшие годы, целесообразно изготовить в виде выкатных. В дальнейшем удельный вес распредустройств этого исполнения должен увеличиться.

Для стационарных камер, изготавливаемых в приобъектных мастерских электромонтажных организаций, следует применять конструкцию, разработанную Московским проектно-конструкторским управлением Центрального электромонтажа. Технология изготовления камер этой конструкции

более проста в связи с тем, что она базируется на заводских профилях стали и не требует крупных гибочных станков и больших тинных ножниц. Камеры конструкции Св электромонтажа следует изготавливать на за и в крупных центральных мастерских, оснащенных необходимым оборудованием. Цеховые станции малой и средней мощности целесообразно оборудовать преимущественно стационарными распредустройствами с выключателями на и предохранителями.

[30]



Электрический вал трехфазного тока в электроприводах металлорежущих станков

Доктор техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

Центральная научно-исследовательская лаборатория электропривода и автоматики треста «Электропривод»

Электрический вал в мощных токарных станках. В современных крупных токарных станках с высотой центров, достигающей более 1,5 м, и длиной до 40 м при мощности главных двигателей 2×100 кВт и даже 2×150 кВт особые затруднения вызывает передача движения от шпинделей к суппортам. В таких крупных станках обычная механическая связь между шпинделем и суппортом посредством ходового винта уже не оправдывается. Изготовление весьма длинного винта обходится сравнительно дорого, к тому же винт может оказаться недостаточно жестким. Приходится вместо механической связи между шпинделем и суппортами использовать электрическую связь в форме так называемого «электрического вала» или вернее — «электрического рабочего вала» (различие между этими двумя понятиями см. ниже).

На больших токарных станках число суппортов может быть 2, 4 или 6, так как обработка крупных изделий производится одновременно несколькими суппортами с обеих сторон станка. Дороговизна ходовых винтов оправдывает применение чисто электрической связи — «электрического вала».

От электрического вала требуется обеспечение постоянства отношения скоростей шпинделя и подачи, тогда сечение стружки не будет зависеть от скорости планшайбы. Вал должен также позволять регулировать это отношение в известных пределах.

Изменение отношения скоростей, обуслов-

Схемы электрического вала трехфазного тока известны сравнительно давно. В последнее время появились некоторые новые схемы электрического вала с комбинированным питанием обмоток статора асинхронных машин одновременно постоянным и трехфазным током, находящие применение в электроприводах мощных токарных станков. Описываются результаты экспериментального исследования таких схем, а также методика экспериментов.

ленное изменением на ки двигателя шпинделя невелико и несущественно. Каждый из суппортов должен иметь возможность работать по ру — с передним или ним шпинделем, а так

приводиться в движение при остановке шпинделей.

На практике используются две системы электрического вала для токарных станков: 1) применяемая с 1923 г., на постоянном токе; 2) новая система на переменном токе, имеющая разновидности, о которых будет сказано ниже.

В первой системе с двигателем шпинделя механически соединяется генератор, который питает по схеме переменного напряжения двигатели одновременно работающих суппортов. При такой связи скорость вращения и соответственно напряжение генератора пропорциональны скорости шпинделя. Очевидно, что и скорости двигателей суппортов будут также пропорциональны скорости шпинделя. Эти двигатели могут переключаться на независимую сеть питания при останове шпинделя.

В системах на переменном токе используются одна из схем рис. 3 (подробно см. ниже).

Системы электрического вала переменного тока имеют преимущества перед системой постоянного тока в отношении точности. В системе постоянного тока двигатель шпинделя, генератор и двигатели суппортов имеют различные мощности, их механические характеристики неодинаковы, и при изменении нагрузки будет слегка изменяться отношение скоростей. Впрочем, при грубых фрезерных работах это обстоятельство не имеет большого значения.

¹ Доклад на Научно-технической сессии ВНИТОЭ по электроприводу металлорежущих станков в Ленинграде в ноябре 1950 г.

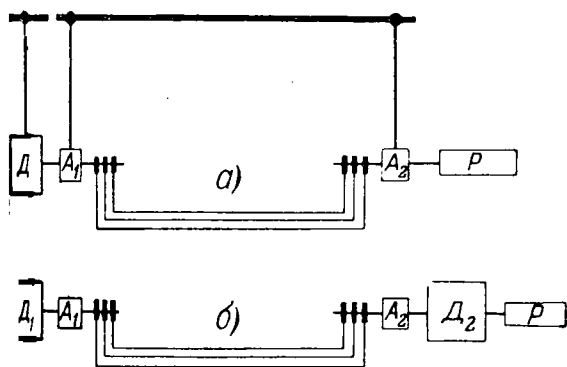


Рис. 1.

а — рабочий; б — уравнительный электрический вал.

Рабочий и уравнительный электрические валы (рис. 1) В схеме рабочего электрического вала (рис. 1, а) имеется только один рабочий двигатель D . Вращая механически связанную с ним уравнительную машину A_1 , двигатель D развивает при этом некоторый момент. Машина A_1 передает электрически свою роторную мощность второй уравнительной машине A_2 , которая, в свою очередь, приводит вращение вал нагрузочной машины P , развивая при этом требуемый момент нагрузки $M_{\partial\partial}$. При вращении уравнительных машин по полю момент $M_{\partial\partial}$ меньше $M_{\partial\partial}$, и потому ведущий вал не должен развивать полного крутящего момента нагрузки.

Пустимая по условиям статической устойчивости нагрузка уравнительной машины M_2 , развиваемая одновременно рабочим двигателем, должна в точности равняться или весьма мало отличаться максимально возможный момент нагрузки. Ведущий рабочий двигатель можно вывести не на полный момент, так как электрический вал сам развивает момент $M_{\partial\partial} - M_{\partial\partial}$. При вращении уравнительных машин против поля условия складываются менее благоприятно. Ведущий двигатель в этом случае должен не только развивать полный момент нагрузки, но и покрывать потерю $M_{\partial\partial} - M_{\partial\partial}$ — момент самого вала (рис. 2).

Уравнительный электрический вал (рис. б) служит для поддержания одинаковыми направлений вращения двух или нескольких нагрузочных валов. Моменты нагрузки $M_{\partial 1}$ и $M_{\partial 2}$ в основном покрываются двумя приводными двигателями A_1 и A_2 . Если оба момента нагрузки одинаковы, а двигатели A_1 и A_2 имеют одинаковые механические характеристики, то моменты двигателей также одинаковы. Когда возникает какая-нибудь разница в моментах нагрузки $M_{\partial 1}$ и $M_{\partial 2}$, то благодаря действию уравнительного вала оба двигателя попадают в точки равновесия их механических характеристик. В частности, если принять, что нагрузка на валу выше, то

$$M_{\partial} = M_{\partial 1} + M_{\partial\partial}, \quad M_{\partial} = M_{\partial 2} - M_{\partial\partial},$$

$$M_{\partial 2} - M_{\partial 1} = M_{\partial\partial} + M_{\partial\partial}.$$

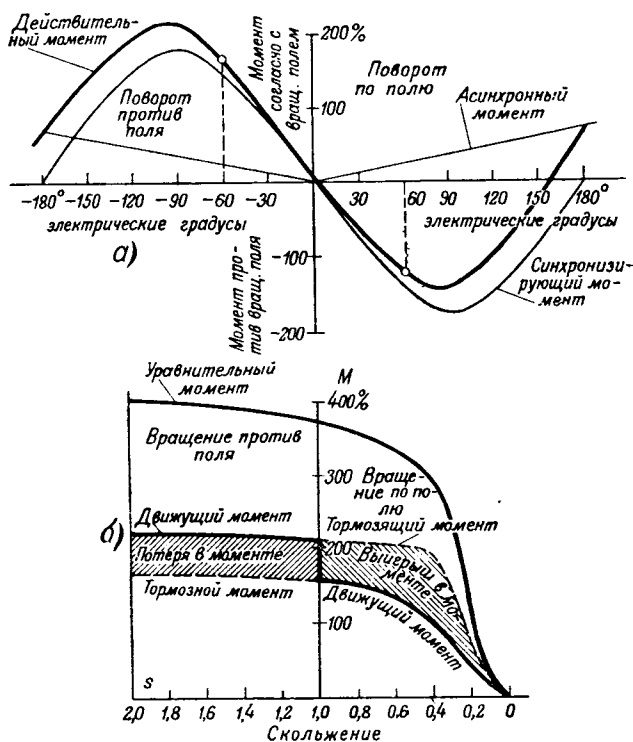


Рис. 2. Типовые характеристики трехфазного электрического вала.

а — диаграмма крутящих моментов (в процентах от номинального) в неподвижном состоянии; б — максимальное значение движущего, тормозного и уравнительного моментов в пределах устойчивой работы.

Следовательно, сумма воспринимаемого и отдаваемого моментов вала равна разности моментов нагрузки обеих рабочих машин. Отсюда следует, что наибольшая разность моментов нагрузки, которую может покрыть уравнительный вал, равна сумме получаемого и отдаваемого им моментов в пределах его устойчивости. Какой из этих моментов больше, безразлично для оценки уравнительных свойств вала. Из рис. 2 видно, что вращение против поля обуславливает более высокие значения момента.

Существенное влияние на нагрузку приводных двигателей оказывает направление вращения уравнительных машин — по полю или против поля. При идеальном вале каждая из его машин должна была бы развивать, даже при неодинаковых моментах нагрузки $M_{\partial 1}$ и $M_{\partial 2}$, один и тот же момент

$$\frac{M_{\partial 1} + M_{\partial 2}}{2}.$$

При реальном вале, работающем с потерями энергии, дело обстоит иначе: при возникновении разности нагрузок в случае вращения против поля **появляется добавочная нагрузка**, при вращении по полю **создается разгрузка**. Это становится понятным на основании следующих формул:

вращение по полю

$$M_{\partial} = \frac{1}{2} (M_{\partial 1} + M_{\partial 2}) - \frac{1}{2} (M_{\partial\partial} - M_{\partial\partial});$$

вращение против поля

$$M_{\partial} = \frac{1}{2} (M_{\partial 1} + M_{\partial 2}) + \frac{1}{2} (M_{\partial\partial} - M_{\partial\partial}).$$

Выражение во вторых скобках положительно, следовательно, в первом случае разность моментов нагрузки покрывается валом, во втором, наоборот, приводные двигатели получают добавочную нагрузку.

Часто ставится требование, чтобы уравнильный вал действовал так же, как рабочий вал, например, когда при выходе из строя одного из собственно приводных двигателей установка должна продолжать работу. В таком случае уравнильная машина, оставшаяся без приводного двигателя, должна сама развивать наибольший требуемый момент нагрузки. Для этого случая сохраняют силу те же уравнения, которые были приведены выше. Особенно следует обратить внимание на то, что сохранившийся приводный двигатель должен теперь развивать момент удвоенный против его номинального и покрывать к тому же потери вала при вращении против поля или за вычетом их при вращении по полю. Практически это может составить для приводного двигателя нагрузку примерно в 180 или 220% его номинальной нагрузки. Для асинхронных двигателей в таких случаях при известных обстоятельствах может возникнуть реальная опасность опрокидывания.

Особенности электрического вала для металлорежущих станков (лобовые и карусельные станки). Передача момента при одинаковых скоростях вращения или при постоянном отношении этих скоростей посредством электрического вала на практике осложняется возможностью возникновения самовозбуждающихся качаний. Такая опасность в принципе существует, так как уравнильный (синхронизирующий) момент действует как пружина, закручиваемая между концами обоих валов. Опасность появления качаний увеличивается по мере приближения к синхронной скорости. Однако при известных условиях качания могут возникнуть и внутри устойчивого диапазона работы, при более низких скоростях и при углах рассогласования, меньших чем 90° (электрических).

Возможность появления качаний не должна переоцениваться при обычных установках с электрическим валом, так как трение в приводимых машинах создает естественное успокоение. Более реально опасность качаний в приводах металлорежущих станков с малыми передаваемыми моментами, где отсутствуют мощные естественные средства успокоения. Относительно небольшие толчки нагрузки, практически неизбежные удары в зубчатых редукторах механизма подачи на металлорежущих станках могут расстроить синхронное вращение вала, что может привести к порче изделия или резца, а иногда и станка.

В последние годы предложен ряд новых схем электрического вала, исключающих качания при всех условиях. На рис. 3 показаны принципиальные схемы включения уравнильных машин в новых системах электрического вала.

На схеме *а* рис. 3 показано параллельное включение в цепи роторов омического и индуктивного сопротивлений, что дает повышение

устойчивости вала при сравнительно небольшом добавочном расходе электрической энергии. Иногда предлагается чисто однофазное питание статоров при разомкнутой третьей фазе (рис. 3, *б*). На рис. 3, *в* показана схема последовательного включения обмоток статоров, дающая приблизительно те же характеристики, что и схема *б*. В схеме *г* обмотки статора включены в три фазы при замкнутой накоротко одной фазе. Схема отличается от схемы *г* только соединением концов в звезду.

В последнее время было установлено, что посредством питания статора постоянным током можно эффективно предупреждать возникновение качаний при толчках нагрузки; этим качания устраняются и возможность разбега ведомой (приемника) до синхронной скорости, идущего как следствие качаний.

На рис. 3 показаны также две схемы *е* и *ж* с применением постоянного тока. На схеме *е* все три фазы, из которых две соединены параллельно, обтекаются постоянным током, в схеме *ж* две фазы обтекаются переменным током, а третья фаза соединена последовательно и обтекается постоянным током.

Возбуждение третьей фазы постоянным током не только препятствует выпадению вала из синхронизма и разбегу его до полной скорости, но оно дает одновременно и некоторое усиление синхронизирующего момента.

Введение в схемы электрического вала постоянного тока как бы приближает свойства асинхронной машины к синхронным. Существует взгляд, что посредством синхронных двигателей можно было бы проще всего разрешить проблему электрического вала. Однако применение синхронных двигателей не может обеспечить сохранение синхронизма вращения обоих валов в периоды неустановившихся движений (пуща, выбега). Далее, синхронные двигатели связаны только с одной постоянной скоростью вращения, определяемой частотой сети. Для работы в других скоростях следовало бы устанавливать специальные преобразователи частоты. Наконец, синхронные двигатели при малых мощностях трудно выполнимы, относительно дороги и не

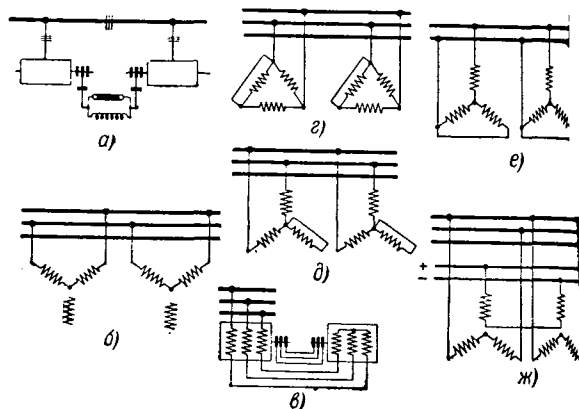


Рис. 3. Схемы электрического вала на переменном токе.

ются в повышенном надзоре во время эксплуатации.

Поэтому на практике получили распространение схемы электрического вала с асинхронными двигателями.

Задачи и объем работы по исследованию электрического вала. В качестве первого решения схемы электрического вала были предложены схемы электрического вала на постоянном токе для связи между шпинделем и суппортом мощных токарных станков. Схемы представляли собой следящие системы с управлением скорости и углом рассогласования валов, в которых используются электромашинные усилители двигателя регулируемого напряжения. В одной из схем применены обычные сельсины с электронным усилителем, в другой — сельсины специальной конструкции повышенной мощности, не требующие электронного усилителя.

Ввиду сравнительной сложности и дороговизны схем, они были заменены более простой схемой с применением асинхронных двигателей трехфазного тока нормального исполнения с контактами и кольцами.

В программу исследования первоначально вошли две схемы:

1) Схема с питанием статоров переменным и постоянным током (рис. 3, ж). Один из асинхронных двигателей механически соединяется с ведущим валом в качестве уравнилительной машины, второй является рабочим двигателем суппорта и вращается совместно с первым. Контактные кольца двигателя в этой схеме (как и во всех последующих) соединяются наглухо между собой. Две фазы тока питаются однофазным током, третья фаза питается от источника постоянного тока.

2) Схема с питанием статоров однофазным током и с закороченной третьей фазой статора (рис. 3, з). Обмотки статора в этом случае включаются в треугольник, однако они могут быть соединены и в звезду (рис. 3, д).

В процессе работы выявилась необходимость введения еще трех схем:

3) Однофазная схема, подобная схеме по поз. 1, но без питания постоянным током (рис. 3, б).

4) Однофазная схема с двумя параллельно включенными фазами (рис. 3, е).

5) Обычная трехфазная схема.

Последние три схемы достаточно известны и получили распространение на практике. Схемы по поз. 1 и 2 — сравнительно новые. Схема по поз. 1 появилась в практике только во время Великой Отечественной войны и, насколько известно, еще нигде в литературе не была описана. В исследовании были поставлены следующие задачи:

а) получение статических и динамических характеристик перечисленных пяти схем электрического вала и их сравнительная оценка;

б) формулировка руководящих указаний для выбора схемы и машин электрического вала применительно к конкретному случаю — передачи движения к суппортам в мощных токарных станках.

Экспериментальное исследование. Испытания производились по схеме рабочего электрического вала. Установка была собрана из четырех машин; ведущий двигатель — постоянного тока 220 в, 7 квт, 800/1600 об/мин; уравнилительные (синхронизирующие) машины в виде двух асинхронных двигателей типа ТА с контактными кольцами 220/127 в, 11 квт, 1400 об/мин; в качестве нагрузки, имитировавшей действительную нагрузку второго асинхронного двигателя, применялся генератор постоянного тока ПН-85 120 в, 7,8 квт, 1800 об/мин.

Опыты производились в широком диапазоне скоростей вращения главного (ведущего) двигателя: 200, 400, 800, 1200 и 1500—1600 об/мин.

Для каждой из пяти исследованных схем опыты были проведены в следующем объеме: 1) работа вала при разных нагрузках и разных скоростях для установления предельных нагрузок до выпадения вала из синхронизма, при статическом и при ударном приложении нагрузки; 2) опыты с неподвижным валом для определения статической точности или угла рассогласования валов при различных моментах; 3) опыты с вращающимся валом для определения динамической точности, т. е. изменения угла рассогласования при ударном приложении и сбросе нагрузки.

Статические характеристики для пяти схем приведены на рис. 4. Динамические характеристики определялись посредством осциллографирования тока статора и скоростей вращения обоих валов. Были сняты осциллограммы следующих режимов: 1) пуск в ход электрического вала по трехфазной схеме; 2) толчок и сброс нагрузки для электрического вала по трехфазной схеме; 3) толчок и сброс нагрузки для электрического вала по однофазной схеме с двумя параллельными фазами; 4) толчок и сброс нагрузки для электрического вала по схеме с питанием одной фазы постоянным током.

Изменение угла рассогласования валов, построенное на основе осциллограмм по поз. 4, показано на рис. 5.

Сравнение статических и динамических характеристик было выполнено на основе рис. 5 и осциллограмм (табл. 1).

Таблица 1

Схема	Момент нагрузки, кгм	Угол α° (геометрический) для:		
		статической нагрузки	динамической нагрузки	
			толчок	сброс
Трехфазная	5,03	7,75°	$\alpha_{\max} = 14^\circ$	—
Однофазная с двумя параллельными фазами	5,03	8,75°	$\alpha_{\max} = 18^\circ$	$\alpha_{\max} = 17^\circ$
Однофазная с питанием одной фазы постоянным током	2,86	24°	$\alpha_{\text{нач}} = 21^\circ$ $\alpha_{\text{кон}} = 42^\circ$ $\alpha_{\max} = 51^\circ$	$\alpha_{\text{нач}} = 42^\circ$ $\alpha_{\text{кон}} = 21^\circ$

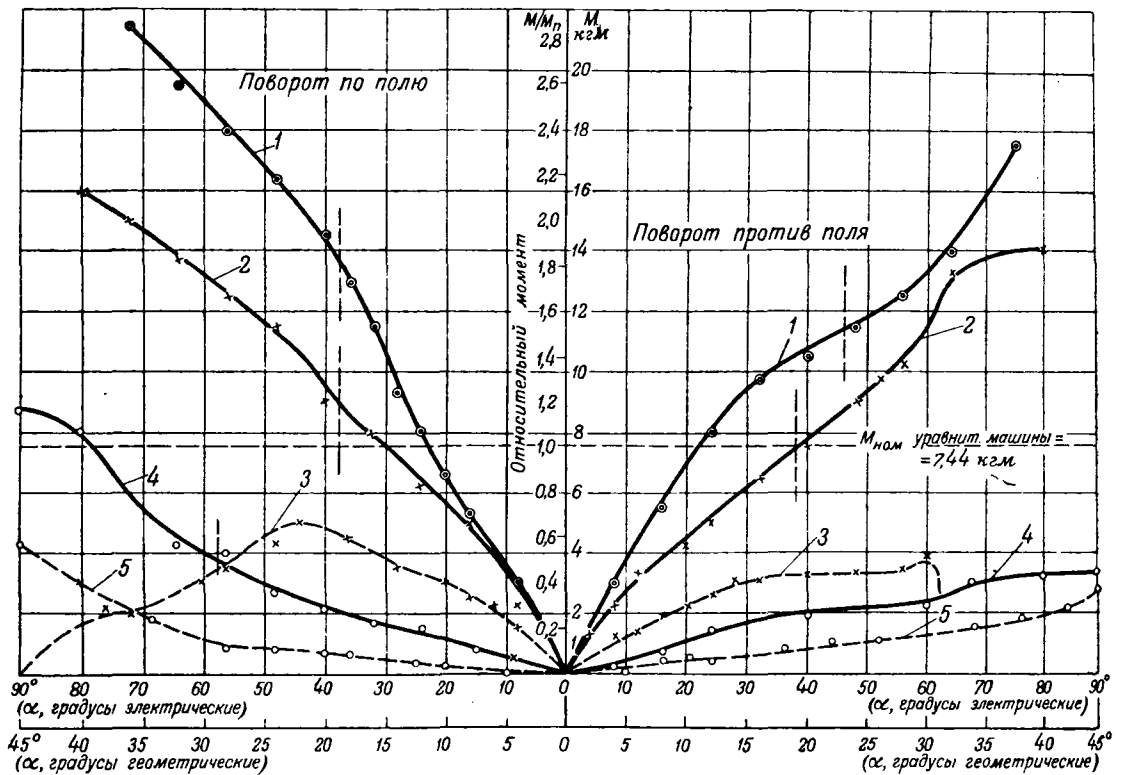


Рис. 4. Статические характеристики электрического вала для исследованных схем.

1 — трехфазное включение 220 в; 2 — однофазная схема 220 в с двумя параллельно включенными фазами (рис. 3, е); 3 — схема с питанием статоров однофазным током 110 в и с закороченной одной фазой; обмотки статора соединены в треугольник (рис. 3, з); 4 — схемы с питанием статоров переменным (220 в) и постоянным токами (рис. 3, ж); 5 — однофазное включение 220 в, но без постоянного тока (рис. 3, с).

Из табл. 1 следует, что динамические характеристики точности существенно отличаются от статических, и углы $\alpha_{дин}$ почти в два раза превосходят соответствующие углы $\alpha_{стат}$ при одном и том же моменте нагрузки на валу. Из рис. 5 следует, что как толчок нагрузки, так и сброс ее сопровождаются качаниями машин. Переходный процесс при сбросе нагрузки протекает дольше, чем при ударном приложении ее (2,1 сек против 1 сек). Но амплитуда качаний угла рас-

согласования оказывается больше при той нагрузке и достигает $\alpha = 51^\circ$ при $\alpha_{нач} = 21^\circ$ и $\alpha_{кон} = 42^\circ$. При сбросе нагрузки амплитуда качаний остается внутри пределов $\alpha_{нач} = 41^\circ$ и $\alpha_{кон} = 21^\circ$.

При оценке величин угла α следует иметь в виду, что эти углы измерены на быстром валу. На практике, при наличии редукционных передач углы α меньше.

Сравнение характеристик разных схем. На рис. 4 сопоставлены экспериментальные статические характеристики для исследованных пяти схем. Правые ветви кривых, представляющие характеристики при повороте по полю, для всех однофазных схем должны быть тождественны с левыми ветвями кривых — характеристиками при повороте против поля. Ветви экспериментальных кривых не тождественны полностью вследствие неидентичности механических характеристик использованных двигателей.

По величине уравнивающего момента или по крутизне характеристик исследованные схемы можно расположить в следующем порядке:

1. Обычная схема силовых сельсинов с трехфазным включением асинхронных машин. Схема дает наиболее жесткую характеристику (рис. 4, кривая 1)

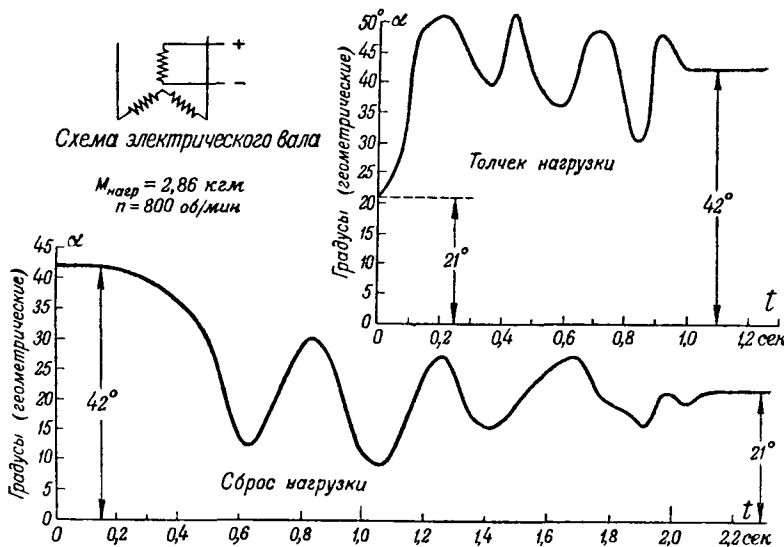


Рис. 5. Изменение угла рассогласования электрического вала при переходных процессах (по осциллограммам).

Таблица 2

Схема	1	2	3	4	5
и эл. град	0,35	0,25	0,15—0,11	0,06—0,05	0,02—0,016
град/кгм	2,85	4	6,7—9	16,7—20	50—86

Таблица 3

Схема		1	2	3	4	5
льный момент по устойчивости	кгм в долях номинального	Не был достигнут	14 1,9	4—5 0,5—0,7	8,5 1,1	4,3 0,57
льный момент по току	кгм в долях номинального	11,5—13,5 1,5—1,8	7,5—9 1—1,2	Не был достигнут	4 0,53	4,3 0,57
ный момент, кгм'а, предельной точке		0,3—0,35	0,19—0,23	0,06—0,11	0,10	0,11

Несколько меньшим моментом обладает азная схема с параллельно включенными и (кривая 2).

Следующая по величине момента — схема фазным включением треугольником (кри-

Четвертое место занимает схема с питанием й фазы постоянным током (кривая 4).

На последнем месте оказывается та же тая схема, но без питания постоянным то- кривая 5).

утизна статических характеристик опреде- отношением M/α° кгм/эл. град. (или об- величиной) для начальной, рабочей Для исследованных нами схем, в том по- как они были сейчас перечислены, значе- α и α/M даны в табл. 2.

ество схемы определяется не только одной ной характеристики, но и допустимым мо- и асинхронных машин по устойчивости и ф. Эти показатели приведены в табл. 3.

воды и рекомендации. Из проведенных ис- ний и анализа их результатов, а также из ческих соображений можно сделать сле- же выводы.

Наилучшими схемами электрического вала ась трехфазная схема 1 и однофазная схе- Остальные схемы как по устойчивости, так ожности работы намного им уступают.

Трехфазная схема 1 дает лучшее использо- машин и уравнильный момент, приблизи- в 1,5 раза больший, чем однофазная схе- Однако для привода суппортов от шпинделя то токарного станка следует рекомендовать фоднофазную схему 2 по следующим сооб- щениям:

схема 2 требует только двух троллейных дов;

обеспечивает согласованную установку при первом включении, тогда как при

трехфазной схеме требуется предварительно од- нофазное включение статоров;

в) в отличие от трехфазной схемы статические характеристики получаются тождественными как при повороте по полю, так и против поля (пред- полагая, что применены вполне однотипные ма- шины), что может иметь значение при реверсив- ной работе;

г) при толчках нагрузки однофазная схема более устойчива.

3. Асинхронные машины по схеме 2 должны выбираться из такого условия, чтобы номиналь- ный момент их был в 2...2,5 раза больше мо- мента нагрузки.

4. Для обеспечения устойчивой работы трех- фазного электрического вала при вращении по полю рекомендуется, чтобы скольжение асинхрон- ных машин было не меньше чем 0,33...0,5 при всех возможных скоростях вращения. Это усло- вие определяет выбор номинальной скорости машины.

5. Коэффициент полезного действия электри- ческого рабочего вала при любой нагрузке в пределах устойчивости и при вращении по полю независимо от вида схемы и скорости вра- щения практически составляет величину одного и того же порядка, равную 0,4...0,5. Эта вели- чина определяет размер добавочной нагрузки на рабочий двигатель.

6. Так как нормальные асинхронные двигатели рассчитаны на работу с низкой частотой в рото- ре, то в условиях электрического вала, когда частота в роторе повышается, следует считаться с повышением нагрева из-за дополнительных потерь в стали ротора.

7. При весьма тлубоком регулировании ско- рости ведущего двигателя, т. е. при работе асин- хронных машин с весьма малыми скоростями, приближающимися к нулю, значительно сни- жается действие вентиляции и повышается на-

грев машин. Это обстоятельство в связи также с п. 6 заставляет снижать допустимый по нагреву момент асинхронных машин иногда до 25% от расчетного, если не приняты особые меры по добавочному охлаждению машин. Конкретных данных и исследований теплового режима машин электрического вала в подобных условиях не имеется.

Следует, впрочем, заметить, что подобные опасения могут возникать лишь при длительной работе вала на малых скоростях.

8. Допустимо параллельное включение нескольких машин-приемников. Тогда датчик выбирается по сумме мощностей приемников.

9. Основное условие, которому должны удовлетворять асинхронные машины вала, — равенство отношения напряжений их первичной и вторичной обмоток; это условие аналогично требованию одинаковых коэффициентов трансформации при параллельной работе трансформаторов.

10. Необязательно, чтобы все машины электрического вала имели одно и то же число полюсов. Если машины имеют разные числа полюсов, то соответственно изменяются их моменты и угловые смещения. Однако скольжения у всех машин вала во время работы будут одинаковыми, независимо от их числа полюсов и синхронных скоростей.

11. Для схем электрического вала можно использовать асинхронные машины нормальной конструкции с контактными кольцами. Машины должны быть однотипные (с учетом п. 9), однако вполне допустимо расхождение их характеристик и показателей в пределах заводских допусков, т. е. не требуется, чтобы машины были специально калиброванными.

Приложение. Методика испытания электрического вала. Экспериментальное исследование схемы электрического вала сопряжено с некоторыми специфическими особенностями, на которых целесообразно остановиться несколько более подробно.

При испытаниях для конкретных условий предварительно нужно испытать в отдельности асинхронные уравновешенные машины с целью проверки идентичности их параметров и характеристик и для возможности построения круговых диаграмм вала. Однако в большинстве случаев ограничиваются комплексным испытанием схемы в собранном виде и делают измерения при холостом ходе и при коротком замыкании (в заторможенном состоянии). По этим двум измерениям строится приближенная круговая диаграмма схемы, точностью которой на практике довольствуются и которая позволяет построить характеристику вала в виде зависимости момента от угла рассогласования валов при вращении в обоих направлениях.

Требование более точных характеристик заставляет прибегнуть к непосредственному измерению моментов и углов отклонения как при неподвижном состоянии (статическая характеристика), так и во время вращения вала и переходных процессов (динамическая характеристика). Иногда ограничиваются снятием только статической характеристики, распространяя ее результаты с известным приближением и на случай вращения.

Методы построения характеристик, основанные на круговой диаграмме, как дающие косвенные результаты, уступают непосредственным методам снятия статических и динамических характеристик.

Экспериментальные методы исследования электрического вала по способу их построения можно разделить на две группы:

1. *Опыты холостого хода и короткого замыкания обеих асинхронных машин для построения круговой диаграммы.*

2. *Опыты холостого хода и короткого замыкания одной асинхронной машины в отдельности для построения круговой диаграммы.*

3. *Непосредственное определение статической характеристики.*

4. *Непосредственное определение динамической характеристики.*

Кроме того, с помощью нагрузочной машины проводятся опыты с различными нагрузками при разных скоростях вращения для определения пределов устойчивости его установки. Одновременно дается также опыты по ударному приложению и нагрузке.

Полезно сравнивать результаты испытаний, выполненные по методам 3, 4 и 5.

Снятие статической характеристики. Первый способ. На валах обеих двигателей устанавливаются рычажки к концам которых присоединяются динамометры. Торцы на концах обоих валов помещаются циферблаты с градусным делением, а на валах — против циферблатов стрелки. Оба вала синхронизируются посредством одного включения статоров, фиксируются на циферблате начальные угловые положения и после этого начинают поворачивать рычаг одного из валов.

При этом замеряют по динамометрам моменты валах. Одновременно записываются токи и напряжения. Измеряется электрический угол взаимного расхождения. Для этого измеряют по циферблатам геометрические поворота обоих валов, складывают их и сумму помножают на $\frac{2p}{2}$, где $2p$ — число полюсов асинхронной машины.

Такие замеры делают для различных положений вала. Как только при дальнейших поворотах вала получают отдаваемый валом момент перестает возрастать, означает, что достигнут предел устойчивости электрического вала, и опыты на этом прерываются. Затем повторяют всю серию испытаний, поворачивая рычаг в другую сторону, или, что практически удобнее, сохраняют прежнее направление поворота рычага, но предварительно меняют направление вращающегося поля, переключая две фазы.

Крутящий момент, создаваемый рукой (подвешенной к валу), больше отдаваемого момента при повороте против поля и меньше отдаваемого момента при повороте по полю.

Второй способ. Один из валов наглухо закрепляется помощью соответствующего тормозного приспособления. Рычаг с динамометром и градусная шкала помещаются только на втором валу, и по ним делают отсчет крутящего момента и угла поворота относительно вала. Второй способ представляется более простым. При работе применялся второй способ.

Снятие динамической характеристики. Опыт сложнее, чем снятие статической характеристики. Можно же применить несколько способов, пригодных для неустановившихся режимов (пуск в ход, ударная нагрузка и т. д.).

Первый способ. С обоими валами сцепляют две машины (нагрузочные генераторы постоянного тока с качающимся статором), посредством которых издают крутящие моменты при вращении валов. С помощью боскопического приспособления определяется угловое расхождение валов, соответствующее каждой нагрузке.

Второй способ. Оба агрегата устанавливаются по одной оси торцами валов навстречу таким образом, чтобы между валами агрегатов оставалось небольшое пространство и чтобы валы вращались в одном направлении. Между агрегатами помещается следующее устройство: осциллографирование углов сдвига одного вала относительно другого; на конце вала одного из двигателей саживается диск, по окружности которого укреплено волоочное сопротивление. К концам сопротивления подводится вспомогательное напряжение через контактные щетки. На валу второго двигателя устанавливается металлическая щетка, натегающая на волоочное сопротивление и соединенная с вращающимся вместе с ней контактным кольцом на том же валу. Напряжение снимается с этого кольца и подается на осциллограф.

Углы расхождения валов и потому, подавая напряжение на петлю осциллографа, можно записывать изменение при нестационарных процессах электрического вала.

можно записывать токи в обмотках статора и ротора.

Третий способ. Нами применялся импульсно-контактный способ для определения расхождения скоростей валов. На каждом из обоих валов был укреплен изолированный диск с одним контактом по его периферии. Каждый диск при вращении замыкал цепь тока и давал на осциллографа одну отметку за каждый оборот. Взяв отсчеты в функции времени для каждого вала, можно установить угол рассогласования валов.

Испытания электрического вала под нагрузкой. При комплексном испытании всей установки, включая и рабочие двигатели, каждый из приводных двигателей сцеплялся с нагрузочными генераторами. С помощью генераторов устанавливаются все нагрузочные режимы как стационарные, так и нестационарные и производятся необходимые замеры. Проверяется сохранение синхронного

вращения как при постоянной скорости, так и во время пуска в ход, торможения, сброса и наброса нагрузки толчком.

Сохранение синхронного вращения проще всего проверить посредством двух одинаковых счетчиков оборотов, которые включаются в момент пуска электрического вала из неподвижного состояния и выключаются при окончании выбега валов. После этого сравниваются отсчеты по обоим счетчикам оборотов.

При выпадении вала из синхронизма нужно быстро отключить асинхронные машины от сети, так как мощность короткого замыкания этих машин велика, учитывая, что это обычно малополусные машины, выполненные с высоким насыщением стали, и их опрокидывающий момент большой.

[2. 10. 1951]



Экспериментальное изучение импульсного разряда в длинном промежутке

Кандидат техн. наук А. А. АКОПЯН и кандидат техн. наук В. П. ЛАРИОНОВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

В статье излагаются основные результаты экспериментального изучения разряда в длинном промежутке при атмосферном давлении [Л. 1] с помощью одновременной фоторазверток и осциллографирования токов и напряжений¹.

Экспериментальная установка. В качестве источника напряжения в установке использовался импульсный генератор на 3 млн. в с емкостью конденсатора 7320 пф (Г, рис. 1). На выход импульсного генератора через тормозящее сопротивление включался разрядный промежуток длиной 200 см. Верхним электродом его служил ртутный стержень. Нижним электродом была медная плоскость //, размером 2,5 × 2,5 м, лежащая на четырех фарфоровых изоляторах и нависающая над медной плоскостью (полюс) размером 8 × 8 м, в двух точках присоединенной к общему заземлителю.

Для измерительного кабеля подключалась обмотка P_1 , а оболочка — к полю P_2 . На другом конце кабеля был включен омический делитель напряжения R_1 . Создаваемое на нем разностью токами падение напряжения короткими проводами проводилось к пластинам явления катодных осциллографов с 20-кв электронными трубками. На одном из них производилась запись лидерного тока, на другом — тока главного разряда. Осциллографы, делитель напряжения и все соединительные провода были тщательно экранированы.

Рассматривается изменение во времени лидерного тока и показывается, что развитие положительного лидера происходит в две стадии, отличающиеся своими характеристиками. Обсуждается соотношение заряды лидера и количества электричества, нейтрализующегося во время главного разряда. Отмечаются особенности развития лидера с электрода отрицательной полярности.

Лидерный ток записывался в достаточно медленной развертке по времени, поэтому приведение в действие соответствующего осциллографа удобнее всего было осуществлять с помощью

импульса напряжения, наводящегося на антенне при срабатывании импульсного генератора. Другой осциллограф, регистрировавший ток главного разряда, пускался в действие от напряжения, создаваемого лидерным током на сопротивлении R_2 [Л. 1].

Измерение напряжения на разрядном промежутке осуществлялось с помощью емкостного делителя.

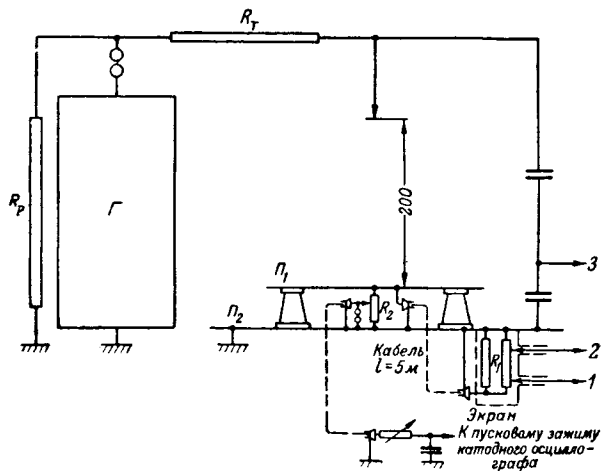


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — к осциллографу измерения лидерного тока; 2 — измерения тока главного разряда; 3 — измерения напряжения на разрядном промежутке.

¹ В проведении экспериментов принимали участие Кабинов, И. Ф. Казакова и О. Н. Оганесян.

Все опыты производились при минимальном напряжении, достаточном для образования разряда.

Изменение лидерного тока во времени. Совместное рассмотрение фоторазверток разрядов с положительного электрода и соответствующих осциллограмм показывает, что в некоторый момент развития лидера происходит резкое увеличение лидерного тока.

В таблице сопоставлены время развития лидера t_A , определенное по фоторазверткам, со временем t'_A от начала повышения тока лидера до момента наступления главного разряда t'_A , полученным на основе осциллограмм тех же разрядов. Опыты производились при тормозящем сопротивлении 7 200 ом.

Номер разряда	Время по осциллограмме от начала увеличения лидерного тока до наступления главного разряда t'_A , мксек	Время развития лидера по фоторазвертке того же разряда t_A , мксек	$\frac{t'_A}{t_A}$ %
1	45,9	56,4	81,3
2	56,9	76,0	74,8
3	43,9	63,4	71,8
4	44,5	55,6	80,0
5	48,9	63,7	70,2
6	46,6	66,7	69,8

Из таблицы следует, что время протекания по лидерному каналу тока повышенной величины составляет при $R_m = 72\,000$ ом только 70—80% от длительности лидерной стадии разряда. Значит, изменение величины тока происходит после того, как лидер проходит около четверти своего пути.

Измерения показали, что напряжение на разрядном промежутке не отстает от аллюра напряжения генератора вплоть до момента резкого увеличения лидерного тока и лишь после этого начинает заметно снижаться. Такой ход изменения лидерного тока и напряжения на промежутке позволяет сказать, что развитие лидера происходит в две стадии, притом на первой (до повышения величины тока) его канал имеет положительную характеристику. Во второй стадии возрастает ток, а напряжение снижается, т. е. появляются элементы дугового разряда — канал имеет отрицательную характеристику.

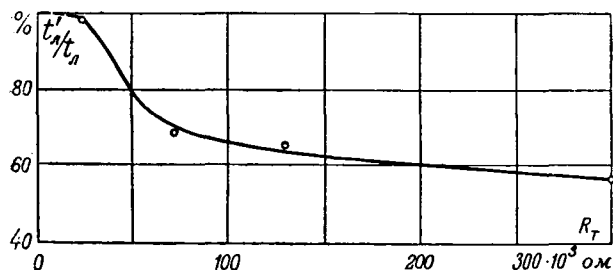


Рис. 2. Длительность дуговой стадии в процентах от времени развития лидера t_A в зависимости от величины тормозящего сопротивления в цепи разряда R_m .

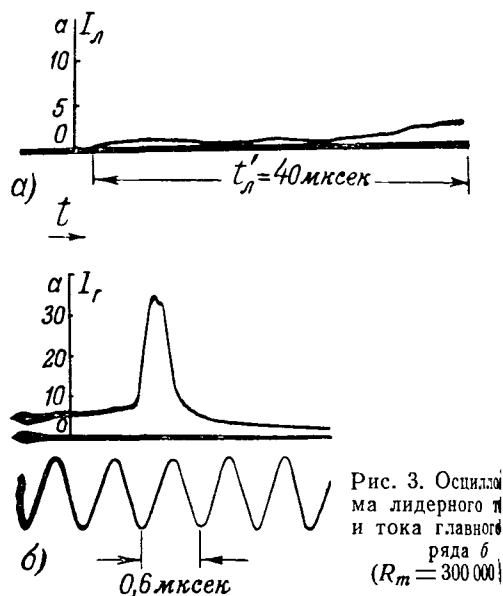


Рис. 3. Осциллограмма лидерного и тока главного разряда 6 ($R_m = 300\,000$)

Относительная продолжительность дуговой стадии развития лидера увеличивается с увеличением величины тормозящего сопротивления в цепи разряда. При R_m порядка 20 000 ом меньше канал лидера имеет характер дугового типа в течение почти всего времени развития. На рис. 2 показана длительность дуговой стадии t'_A , выраженная в процентах времени развития лидера t_A , в зависимости от величины тормозящего сопротивления.

Заряд лидера и количество электричества, нейтрализующееся во время главного разряда. Одновременные измерения лидерного тока и тока главного разряда производились при включенном емкостном делителе напряжения, как он влияет на процесс развития разряда.

При опытах заряды определялись путем интегрирования тока по времени. В случае заряда лидера учитывалась только дуговая стадия развития.

Эксперименты показали, что заряд Q_A , образующийся при распространении положительного

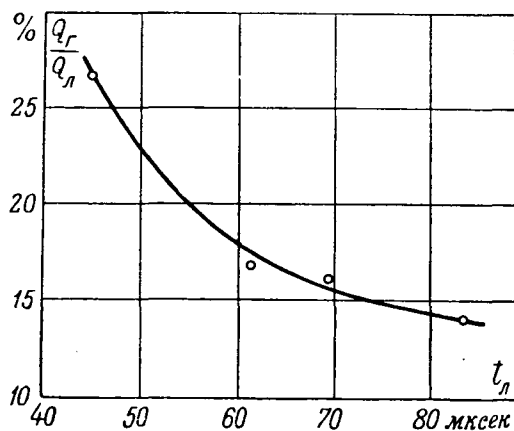


Рис. 4. Отношение количества электричества Q_r , нейтрализующегося главным разрядом, к заряду Q_A , образуемому в лидерной стадии разряда, в зависимости от времени развития лидера t_A .



Рис. 5. Фоторазвертки разрядов в промежутке „отрицательный стержень — стержень на плоскости“, $R_m = 72\,000\text{ ом}$ (стрелками показан непрерывный лидер).



Рис. 6. Фоторазвертка разряда в промежутке „отрицательный стержень — стержень на плоскости“, $R_m = 72\,000\text{ ом}$ (стрелкой показан утолщенный яркий конец ступени).

где, не равен количеству электричества Q_2 , локализирующемуся при главном разряде.

На рис. 3 приведены для иллюстрации осциллограмма лидерного тока и соответствующего главного разряда. По данным многочисленных измерений зарядов и времени развития лидера при разных величинах тормозящего сопротивления в цепи разряда на рис. 4 построена зависимость Q_2/Q_1 от времени развития лидера t_1 .

Из этой кривой видно, что сокращение t_1 (уменьшения тормозящего сопротивления) ведет к повышению отношения Q_2/Q_1 , которое при $t_1 = 45\text{ мксек}$ доходит лишь до 27%.

Низкая величина количества электричества, локализуемого при главном разряде, по сравнению с зарядом, образующемуся во время развития лидера, а также наблюдающееся понижение интенсивности свечения канала главного разряда в направлении к высоковольтному электроду [Л. 1] свидетельствуют о неравномерном распределении зарядов в канале к моменту главного разряда, что дает непосредственное подтверждение высказывавшимся ранее [Л. 2] предположениям о рассеянии зарядов в верхних частях канала молнии.

В связи с этим следует отметить, что оценка неравномерности распределения зарядов вдоль по каналу молнии, производящаяся по измерениям напряженности электрического поля [например, Л. 3], дает противоречивые результаты. Видимо, объясняется тем, что распределение зарядов к моменту главного разряда зависит от скорости развития лидера. В более медленных, быстро развивающихся разрядах непосредственно перед главным разрядом заряды распределены более равномерно, в разрядах малой интенсивности, так как рассеяния зарядов не успевает развиться.

До сих пор в разряде с отрицательного электрода не был обнаружен непрерывный лидер. Предполагалось, что в этом случае во время лидерной стадии развивается с большой скоростью один или несколько следующих друг за другом через определенные промежутки времени предразрядных стримеров — ступеней, затем сразу происходит главный разряд.

Нами обнаружено, что при отрицательном разряде прорастание лидера так же непрерывно, как и в разряде с положительного электрода. На рис. 5 показаны фоторазвертки двух разрядов в промежутке „отрицательный стержень — стержень на плоскости“ при $R_m = 72\,000\text{ ом}$. На этих фоторазвертках четко виден непрерывный лидер, который становится заметным лишь после того, как он пройдет некоторую часть своего пути. На начальной стадии развития непрерывный лидер на фотопленке не фиксируется вследствие малой интенсивности свечения, и о его траектории можно судить по концам ступеней.

Иногда ступень заканчивается утолщенным ярким наконечником так же, как и в разряде молнии (рис. 6). После возникновения такой ступени непрерывный лидер становится видимым.

Обнаружение непрерывного отрицательного лидера в лабораторном разряде указывает на общность механизмов развития отрицательных и положительных лидеров и дает основание для проведения более глубокой аналогии между лабораторным разрядом и молнией.

Литература

1. А. А. Акопян, В. П. Ларионов и Д. В. Разевиг. Экспериментальное исследование индуктированных напряжений на модели линии. Электричество, № 11, 1950.
2. А. С. Али-Заде. Исследование молнии в Закавказье. Электричество, № 6, 1946.
3. И. С. Стекольников. Изучение молнии в горной местности Грузинской ССР. Электричество, № 2, 1940.

[21. 5. 1951]

Пути повышения искусственной устойчивости синхронных генераторов

Кандидат техн. наук Д. П. ЛЕДЯНКИН

Ивановский энергетический институт им. Ленина

Средствам автоматического регулирования возбуждения практически не свойственна нечувствительность (компаундирование, электронный регулятор напряжения), и они позволяют иметь в зоне искусственной устойчивости спокойный режим работы синхронного генератора. Предел искусственной устойчивости соответствует величине, получающейся из условия постоянства продольной составляющей э. д. с. за переходным реактивным сопротивлением E'_d .

Представляется возможным значительно расширить использование области искусственной устойчивости посредством устройства в схеме нормального автоматического регулирования возбуждения стабилизации по изменению избыточного момента на валу машины или стабилизации по производным (первый и второй) угла расхождения векторов э. д. с. синхронного генератора и опорного напряжения. При этом важно, чтобы угол расхождения этих векторов являлся монотонно возрастающей функцией нагрузки генератора. По таким условиям напряжение ряда точек электрической системы может быть принято в качестве опорного. Например, допустимо принять опорным напряжение шин приемной части системы, с которой связан генератор какой-то электропередачей, или э. д. с. какого-либо другого генератора системы.

Стабилизация по производным угла между векторами э. д. с. генератора и опорного напряжения означает фактически стабилизацию по скорости и ускорению расхождения осей основного вращающего поля генератора (поля ротора) и результирующего, соответствующего опорному напряжению.

Как и введение в уравнение регулирования производных изменения напряжения [Л. 1], так и устройство указанных стабилизаций имеют свои преимущества и позволяют увеличить предел искусственной устойчивости до его максимальной величины, получающейся из условия постоянства напряжения на генераторе.

Критерий предела искусственной устойчивости при регулировании со стабилизацией. Рассмотрим поставленную задачу для схемы

Для схемы нормального автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора рассмотрено влияние на статическую устойчивость введения стабилизации по изменению избыточного момента на валу и по производным угла между векторами э. д. с. генератора и опорного напряжения. Отмечены условия выбора опорного напряжения. Показано, что таким путем представляется возможным увеличить предел искусственной устойчивости до его максимального значения по условию постоянства напряжения на генераторе. Установлены требования к настройке стабилизации. Печатается в порядке обсуждения.

работы генератора с постоянным напряжением U . Обозначим через ψ параметр, производным которого представляется ста-
ция. Синхронный генератор в общем случае может замещаться реактивным сопротивлением в по-

ной оси машины X_q и расчетной э. д. с. этой реактивностью X_q .

Расчетная э. д. с.

$$E_s = \dot{U}_2 + jX_q i,$$

где \dot{U}_2 и i — напряжение и ток генератора.

В частном случае при рассмотрении неявнополюсных генераторов, очевидно, ведливо равенство:

$$E_s = E_d$$

где E_d — синхронная э. д. с. генератора.

При неучете переходных процессов, связанных с активным сопротивлением цепей стабилизатора, уравнение регулирования со стабилизацией по производным параметра ψ в случае малых отклонений режима и отсутствия запаздывания регуляторах может быть представлено в следующем виде:

$$(T_e p + 1) \Delta E_{d\infty} = -B_1 \Delta E_s - B_2 \Delta \delta + (B_3 p + B_4 p^2) \Delta \delta + (B_5 p + B_6 p^2) \Delta E_s, \\ p = \frac{d}{dt},$$

где $\Delta E_{d\infty}$, ΔE_s , $\Delta \delta$ — отклонения стационарных значений синхронной э. д. с. $E_{d\infty}$, расчетной э. д. с. E_s и угла ротора δ соответственно; T_e — постоянная времени обмотки возбуждения; $B_3 = k_2 \frac{\partial \psi}{\partial \delta}$; $B_5 = k_2 \frac{\partial \psi}{\partial E_s}$; $B_4 = k_3 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \delta^2}$; $B_6 = k_3 \frac{\partial^2 \psi}{\partial E_s^2}$ — постоянные стабилизации по производным параметра ψ , где k_2 , k_3 — коэффициенты стабилизации по первой и второй производным параметра ψ соответственно; B_1 , B_2 — постоянные основной схемы автоматического регулирования.

где $\Delta E_{d\infty}$, ΔE_s , $\Delta \delta$ — отклонения стационарных значений синхронной э. д. с. $E_{d\infty}$, расчетной э. д. с. E_s и угла ротора δ соответственно; T_e — постоянная времени обмотки возбуждения; $B_3 = k_2 \frac{\partial \psi}{\partial \delta}$; $B_5 = k_2 \frac{\partial \psi}{\partial E_s}$; $B_4 = k_3 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \delta^2}$; $B_6 = k_3 \frac{\partial^2 \psi}{\partial E_s^2}$ — постоянные стабилизации по производным параметра ψ , где k_2 , k_3 — коэффициенты стабилизации по первой и второй производным параметра ψ соответственно; B_1 , B_2 — постоянные основной схемы автоматического регулирования.

Введение стабилизации в действие электронного регулятора обуславливает:

$$\Delta E_s + B_2 \Delta \delta = k \left(\frac{\partial U_2}{\partial E_s} \Delta E_s + \frac{\partial U_2}{\partial \delta} \Delta \delta \right) = k \Delta U_2,$$

ΔU_2 — отклонение напряжения генератора, коэффициент регулирования.

Для случая компаундирования со стабилизацией по производным параметра ψ

$$B_1 \Delta E_s + B_2 \Delta \delta = k_1 \left(\frac{\partial I}{\partial E_s} \Delta E_s + \frac{\partial I}{\partial \delta} \Delta \delta \right) = -k_1 \Delta I,$$

ΔI — отклонение тока генератора;
 k_1 — коэффициент компаундирования.

Для малых колебаний дифференциальные уравнения движения ротора и переходных процессов в обмотке возбуждения генератора имеют

$$(Mp^2 + Dp) \Delta \delta = -\Delta P, \quad (2)$$

$$\Delta E_{d_0} = (A_1 + A_2 p) \Delta E_s - (A_3 + A_4 p) \Delta Q,$$

ΔP и ΔQ — изменения активной (P) и реактивной Q мощности, за реактивным сопротивлением в поперечной оси;

M, D — постоянная инерции и коэффициент демпферного момента генератора.

Постоянные режима:

$$A_1 = 1 - \frac{Q(X_d - X_q)}{E_s^2},$$

$$A_2 = T_0 \left[1 + \frac{Q}{E_s^2} (X_q - X_d') \right],$$

$$A_3 = -\frac{X_d - X_q}{E_s},$$

$$A_4 = \frac{T_0}{E_s} (X_q - X_d'),$$

T_0, X_d, X_q, X_d' — постоянная холостого хода активности генератора.

Изменения мощностей генератора

$$\Delta P = A_5 \Delta E_s + A_6 \Delta \delta,$$

$$\Delta Q = A_7 \Delta E_s + A_8 \Delta \delta, \quad (3)$$

$A_5 \dots A_8$ — постоянные режима, равные значениям частных производных активной и реактивной мощностей по соответствующим переменным.

Общее решение уравнений (1), (2), (3) сводится к дифференциальному уравнению генератора

$$a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 \Delta E_s = 0, \quad (4)$$

коэффициентам которого можно судить о статической устойчивости, а следовательно, и о искусственной устойчивости.

Уравнения типа (4) [Л. 2, 3], отражающие процессы в генераторе, связанные с малыми изменениями его режима, когда автоматическое регулирование возбуждения выполнено без стабилизации, критерием предельного режима является требование

$$a_3 = 0. \quad (5)$$

Режим работы генератора будет статически устойчив вплоть до предельных нагрузок по условию (5) и при регулировании со стабилизацией по производным параметра ψ , если стабилизация выполнена с соблюдением следующего:

$$\left. \begin{aligned} B_5 &\leq 0, \\ B_6 &\leq 0, \\ B_4 &\geq B_3 \frac{a_0}{a_1}, \\ |B_6| &\leq |B_5| \frac{a_0}{a_1}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Неравенства (6) отражают дополнительные условия, вносимые введением стабилизации для соблюдения неравенства устойчивости:

$$a_0 > 0,$$

$$a_1 > 0,$$

$$\left| \frac{a_1 a_0}{a_3 a_2} \right| > 0,$$

$$\left| \frac{a_1 a_0 0}{a_3 a_2 a_1} \right| > 0$$

уравнения (4) вплоть до предельного режима условия (5).

На условии соблюдения неравенства устойчивости

$$a_4 > 0$$

стабилизация влияния не оказывает.

В развернутом виде критерий предельного режима [соотношение (5)] представится:

$$(D + A_6 T_e)(A_1 - A_3 A_7) + A_6(A_2 - A_4 A_7) + A_4 A_5 A_8 + T_e A_3 A_5 A_8 + B_1 D + B_3 A_5 - B_5 A_6 = 0. \quad (7)$$

Когда стабилизация выполнена так, что

$$B_3 A_5 - B_5 A_6 > 0, \quad (8)$$

условия выполнения соотношения (7) наступают при больших нагрузках генератора, т. е. повышается предел статической устойчивости.

Неравенства (6) ... (8) позволяют ориентироваться в выборе параметра стабилизации по производным.

Так, стабилизация по производным угла между векторами э. д. с. генератора и опорного напряжения, равно как и регулирование по производным напряжения генератора, повысит предел искусственной устойчивости. В обоих случаях

$$B_3 > 0, B_4 > 0,$$

$$B_5 < 0, B_6 < 0.$$

Но потребная скорость изменения напряжения возбудителя больше в случае регулирования по производным напряжения. Например, в случае работы генератора на шины постоянного напряжения, если в качестве опорного напряжения принято напряжение этих шин ($\psi = \delta$), имеем:

$$\begin{aligned} B_5 &= 0, \\ B_6 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

и уже при небольших коэффициентах стабилизации k_2, k_3 достигнем значительного повышения предела статической устойчивости.

Одновременно неравенства (6)...(8) показывают, что совершенно нецелесообразно для повышения статической устойчивости стабилизация по производным тока, э. д. с., мощности генератора.

Наоборот, регулирование со стабилизацией по изменению избыточного момента на валу генератора положительно влияет на статическую устойчивость.

В этом случае уравнение регулирования (1) запишется:

$$(T_e p + 1) \Delta E_{d\infty} = -B_1 \Delta E_\delta - B_2 \Delta \delta - k_3 \Delta P, \quad (10)$$

где k_3 — коэффициент стабилизации по изменению избыточного момента ΔP .

Учитывая уравнения (2) и принимая:

$$\begin{aligned} k_3 D &= B_3, \\ k_3 M &= B_4, \\ B_5 &= 0 \text{ и } B_6 = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

можно считать соотношение (7) критерием пределов искусственной устойчивости и в случае регулирования со стабилизацией по изменению избыточного момента на валу. Дополнительные требования устойчивости (6) сведутся в разбираемом случае к неравенству

$$M \geq D \frac{a_0}{a_1}. \quad (12)$$

Значение D в относительных единицах определяется единицами [Л. 1] и обычно численно меньше постоянной инерции. В таких условиях соотношение (12) всегда соблюдается.

Влияние стабилизации на предел искусственной устойчивости. Характер стационарной характеристики мощности генератора, очевидно, зависит от условий ее построения. Установим условия максимума характеристики при следующем законе построения:

$$\begin{aligned} T_e E_d - B_5 E_\delta + T_0 E'_d - \frac{D}{A_5} (A_1 - A_3 A_7 + B_1) \delta - \\ - B_3 \delta = m = \text{const.} \end{aligned} \quad (13)$$

Примем постоянные регулирования B_3, B_5, B_1 , а также величины A_1, A_3, A_7, A_5 неизменными и соответствующими предельному режиму искусственной устойчивости.

В соотношении (13): E'_d — продольная ляющая э. д. с. за переходным реактивным противлением; m — постоянная.

Условие максимума характеристики мощи запишется:

$$\frac{dP}{d\delta} = A_5 \frac{dE_\delta}{d\delta} + A_6 = 0.$$

В развернутом виде условия максимума д характеристики с законом построения (13), вая, что

$$E_d = E_\delta + \frac{Q}{E_\delta} (X_d - X_q),$$

$$E'_d = E_\delta - \frac{Q}{E_\delta} (X_q - X'_d),$$

$$\frac{dQ}{d\delta} = A_7 \frac{dE_\delta}{d\delta} + A_6,$$

можно представить выражением, полностью падающим с записью (7). Следовательно, мум характеристики мощности генератора строенной при соблюдении условия (13), характеризует предел искусственной устойчивости обеспечиваемый регулированием со стабилизацией. При надлежащем выборе коэффициентов стабилизации можно обеспечить пропорциональность постоянной m соотношения (13) напению генератора U_δ :

$$m = n U_\delta,$$

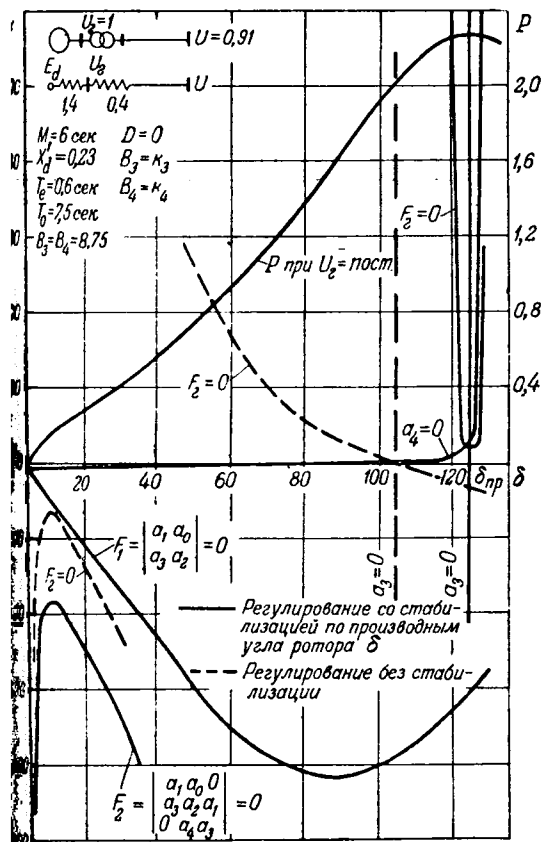
где n — коэффициент пропорциональности.

В таком случае предел искусственной устойчивости повышается до его максимального значения, получающегося из условия постоянного напряжения на шинах генератора. Необходимо для этого значения постоянных стабилизаторов B_3 и B_5 подсчитываются по соотношению (7), значение всех постоянных взять для предельного режима искусственной устойчивости.

На рис. 1 сплошные кривые линии дают левые значения неравенств устойчивости частного случая регулирования электронного регулятора напряжения со стабилизацией производным угла между векторами э. д. генератора и напряжения шин приемной системы (параметр $\psi = \delta$); пунктирными линиями показаны те же кривые при работе без стабилизации (по оси ординат отсчитывается k — коэффициент регулирования по напряжению, по абсцисс — угол δ).

В рассмотренном примере принята одинаковая стабилизация как по первой, так и второй производной с коэффициентами $k_2 = k_3 = \delta$, что достаточно для обеспечения устойчивости вплоть до предела, получающегося из условия постоянства напряжения на генераторе.

На рис. 2 приведены аналогичные кривые для частного случая работы электронного регулятора со стабилизацией по изменению избыточного момента на валу генератора. К видно, стабилизация с коэффициентом $k_3 = 6$ обеспечивает статическую устойчивость вплоть до максимального предела искусственной устойчивости.



1. Нулевые значения неравенств устойчивости F_1 , F_2 , a_4 и a_3 . P — мощность генератора.

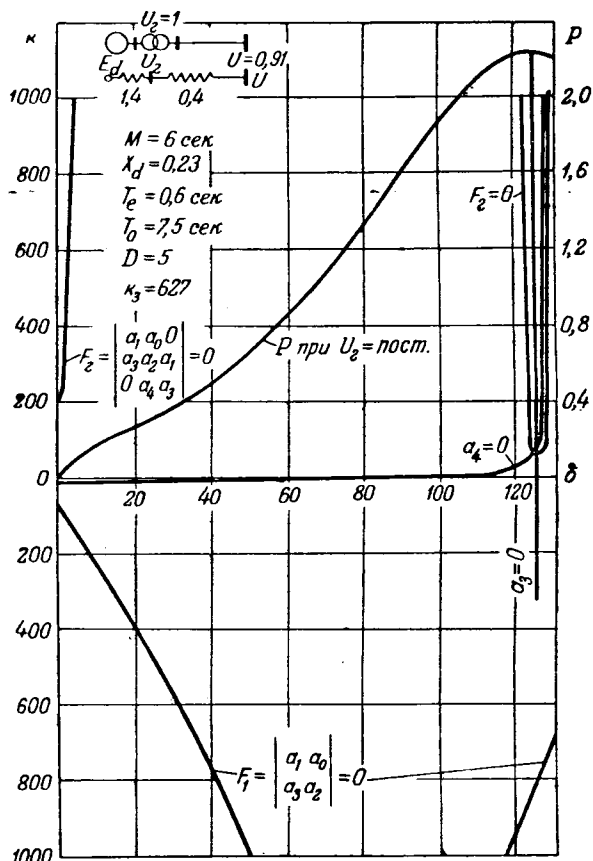


Рис. 2. Нулевые значения неравенств устойчивости F_1 , F_2 , a_4 , a_3 при регулировании со стабилизацией по изменению избыточного момента на валу генератора. P — мощность генератора.

Заключение. Стабилизация по изменению избыточного момента на валу или по производным между векторами э. д. с. генератора и опорного напряжения в обычных схемах автоматического регулирования возбуждения, которым практически не свойственна нечувствительность, позволяет повысить предел искусственной устойчивости вплоть до его величины по условию единства напряжения на генераторе, причем стабилизация по изменению избыточного момента на валу фактически есть стабилизация по мощности генератора с автоматической коррекцией действия по мощности турбины. Потребная скорость изменения напряжения генератора обуславливается стабилизацией по производным угла между векторами э. д. с. генератора и опорного напряжения и зависит от

выбора опорного напряжения, но вообще значительно меньше, чем в случае повышения устойчивости введением в уравнение регулирования производных напряжения.

Литература

1. С. А. Лебедев, П. С. Жданов и др. Труды ВЭИ, вып. 40, Госэнергоиздат, 1940.
2. Д. П. Ледянкин. Статическая устойчивость автоматического регулирования напряжения синхронного генератора. Диссертация. ВЭИ, 1946.
3. Д. П. Ледянкин. Основы применения модели системы для подсчета предела искусственной устойчивости работы электрической системы. Ивановский энергетический институт. Сборник научных трудов, вып. IV. Госэнергоиздат. 1951.

[7. 12. 1949]



Чувствительная защита от замыканий на землю с кабельными трансформаторами тока

Кандидат техн. наук И. Н. ПОПОВ

ЦНИЭЛ МЭС

Мероприятия по снижению токов замыкания на землю, проводимые в сетях 3, 6 и 10 кВ с целью повышения надежности работы оборудования [Л. 1 и 2], потребовали применения для генераторов более чувствительной защиты от замыканий на землю. Такое же требование предъявляется и к защите воздушных линий торфопредприятий в связи с необходимостью отключения однофазных замыканий на землю в сетях этих предприятий при токах 0,5... 1 а по условиям техники безопасности.

Для выполнения чувствительной защиты необходимы фильтры токов нулевой последовательности I_0 с малыми токами небаланса при установившихся и переходных процессах, а также реле с малым потреблением при трогании. Фильтры токов нулевой последовательности с фазными трансформаторами тока имеют весьма большие токи небаланса, отстройка от которых не обеспечивает требуемой чувствительности, значительно усложняет схему и снижает надежность защиты [Л. 3].

При наличии кабельных выводов или кабельных вставок чувствительная защита может быть выполнена с помощью кабельных трансформаторов тока с кольцевыми сердечниками, охватывающими трехфазный кабель, и с равномерно распределенной вторичной обмоткой. Такие трансформаторы являются весьма точными фильтрами токов нулевой последовательности, имеющими малые токи небаланса в установившихся и переходных режимах. Это позволяет применять реле с малым потреблением.

Чувствительность защиты будет определяться отдаваемой трансформаторами мощностью, потреблением реле, а в случае токового принципа устройств защиты также степенью отстройки от собственных емкостных токов генератора или линии. Условие отстройки может быть выражено следующим образом:

$$I_{13m} = k_z I_C.$$

Коэффициент запаса k_z выбирается равным 5, что обеспечивает отстройку от бросков емкостного тока при перемежающихся заземлениях [Л. 4].

Рассматриваются методы выполнения чувствительной защиты от замыканий на землю с применением кольцевых кабельных трансформаторов тока. Даются основные соотношения для выбора и расчета кабельных трансформаторов. Сравняются варианты защиты, в которых применены кабельные трансформаторы с сердечниками из различных материалов.

При невозможности одновременно удовлетворить требованиям чувствительности и отстройки от емкостных токов чувствительная защита от замыканий на землю должна выполняться с реле направленного действия.

Принципиальные схемы токовой защиты генераторов приведены на рис. 1. Токи трогания защиты равны 3... 5 а [Л. 1, 2]. При одном из вариантов (рис. 1, а) в схеме можно не применять токовой блокировки, так как благодаря малым значениям токов небаланса у рассматриваемых фильтров чувствительная защита оказывается отстроенной от них с высоким коэффициентом запаса даже при больших кратностях тока короткого замыкания. При нескольких кабельных трансформаторах (рис. 1, б) трансформаторы устанавливаются на каждом из них и включаются параллельно. В этом случае токи небаланса могут быть весьма малы, если токи нагрузки в фазах одного кабеля распределены симметрично.

Эта симметрия практически обуславливается отсутствием разъединителей в цепи кабелей, наличие которых могло бы вызвать неодинаковые переходные сопротивления в фазах, и малой величиной переходных сопротивлений контактных соединений кабеля с шинами (10^{-5} ом) по сравнению с сопротивлением фаз кабеля (10^{-3} ом) при длине 10... 15 м). При значительном изменении переходного сопротивления контакта в обрыве фазы одного из кабелей происходит нарушение фазной симметрии токов в кабелях.

Это нарушение можно представить как изменение на токи нагрузки системы двух токов нулевой последовательности, равных по величине и противоположных по фазе. Один из токов протекает по кабелю с увеличенным сопротивлением, а другой разветвляется по остальным кабелям.

При точной работе трансформаторов нарушение фазной симметрии не может вызвать токи небаланса. Однако в действительных условиях при числе кабелей больше двух и фазной асимметрии трансформаторы кабелей с нарушением

¹ Последовательное соединение трансформаторов рассматривается вследствие появления больших индуктивных в сердечниках при нарушении фазной симметрии.

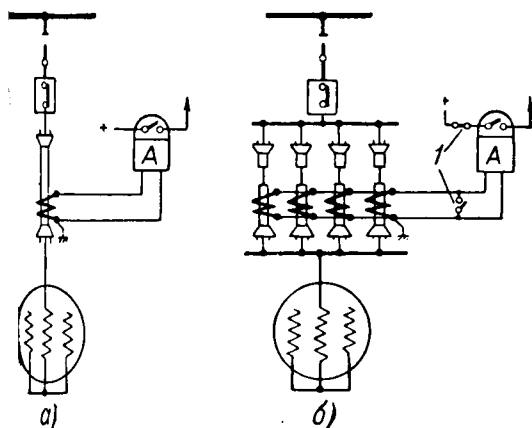


Рис. 1. Принципиальные схемы токовых защит генераторов.

а — вывод выполнен одним кабелем; б — вывод выполнен несколькими кабелями; 1 — контакты блокировочного реле.

контактами и кабелей с исправными контактами работают при разных первичных токах, следовательно, при разных индукциях, определяемых падениями напряжения на полных сопротивлениях вторичной обмотки. Это и является причиной появления токов небаланса.

Однако такие условия мало вероятны и свидетельствуют о нарушении нормального режима. Кроме того, в схеме фильтра токов нулевой последовательности с применением фазных трансформаторов токи небаланса достигают значительной величины при нормальном режиме, при таких же переходных процессах они сильно возрастают.

С целью предотвращения неправильных действий защиты в указанных выше маловероятных случаях нарушения нормального режима предусматривается применение токовой блокировки, выводящей защиту из действия при токах более 1,5 и более точных кабельных трансформа-

Необходимая точность трансформаторов достигается путем выбора возможно большего сопротивления цепи намагничивания и возможно большего сопротивления вторичной обмотки. Благодаря этому при фазной несимметрии, составляющей 20...30%, и при наличии апериодической составляющей в первичном токе, ток небаланса вдвое меньше тока трогания реле.

В воздушных линиях, питающих торфопредприятия, устанавливаются кабельные вставки, позволяющие применять кабельные трансформаторы и выполнять чувствительную защиту. До недавнего времени на этих линиях применялась защита с повышением напряжения U_0 , действующая на отключение всей подстанции. Преимущество чувствительной токовой защиты заключается в том, что она действует на отключение поврежденной линии.

Схема защиты линий приведена на рис. 2. В качестве резервной защиты используется однофазная защита для пуска токовой защиты.

Средства защиты и сигнализации с кабельными трансформаторами тока, имеющими серд-

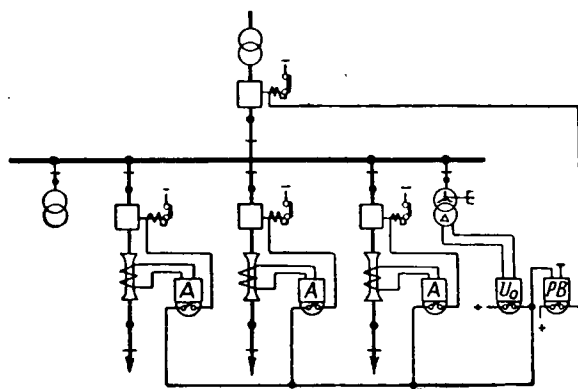


Рис. 2. Схема защиты от замыканий на землю линий, питающих торфопредприятия.

дечники из трансформаторной стали (без подмагничивания), обладают низкой чувствительностью [Л. 4 и 5]: $I_{13m} \approx 13...18$ а. Это связано не только с наличием сравнительно грубых реле, но и с тем, что при слабом намагничивании, особенно при малых токах замыкания на землю, стальные сердечники кабельных трансформаторов работают с весьма малыми индукциями (менее 30 гс), отдавая незначительную мощность даже при больших размерах. Кроме того, вследствие низкой магнитной проводимости стали в этих условиях и не вполне равномерного распределения вторичной обмотки ввиду больших размеров сердечника токи небаланса таких трансформаторов могут оказаться соизмеримыми с токами трогания чувствительных реле.

Одним из средств, обеспечивающих повышение чувствительности защиты и снижение токов небаланса, является применение для сердечников кабельных трансформаторов сталей и ферромагнитных сплавов, имеющих при слабых полях более высокие индукции, чем трансформаторная сталь.

В 1948 — 1949 гг. ЦНИЭЛ МЭС была разработана и внедрена в эксплуатацию опытная серия чувствительной токовой защиты от замыканий на землю для генераторов, синхронных компенсаторов, двигателей с кабельными выводами и линий, питающих торфопредприятия. Сердечники кабельных трансформаторов тока этой защиты изготовлены из пермаллоя. Защита выполнена с помощью чувствительных магнитных усилителей — реле [Л. 6].

Ниже рассматривается защита от замыканий на землю с кабельными трансформаторами тока, имеющими кольцевые сердечники из различных сталей и сплавов и равномерно распределенную вторичную обмотку.

В соответствии со схемой замещения и векторной диаграммой (рис. 3) токи одного кабельного трансформатора (рис. 1, а и 2), приведенные к его первичной стороне, в условиях трогания защиты связаны выражениями

$$I_{13m} = I_{\mu} + I_{pm}, \quad (1)$$

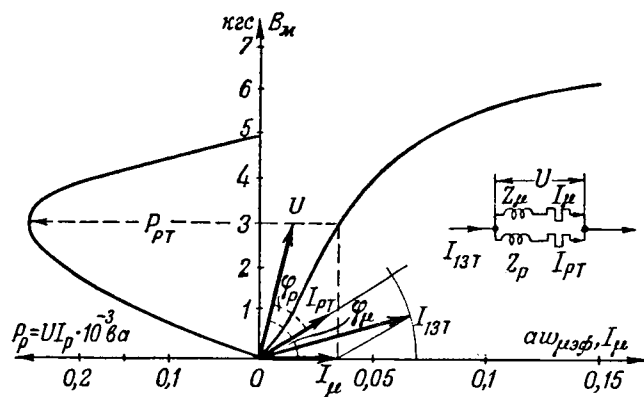


Рис. 3. Схема замещения, векторная диаграмма и зависимость $P_p = f(B_m)$ для защиты с кабельными трансформаторами. Сопротивление вторичной обмотки принято равным нулю.

$$I_{13T}^2 = I_\mu^2 + I_{pT}^2 + 2I_\mu I_{pT} \cos(\varphi_\mu - \varphi_p), \quad (2)$$

где I_{13T} — первичный ток трогания защиты;

I_μ — ток намагничивания сердечника;

I_{pT} — ток трогания реле;

φ_μ — угол сдвига цепи намагничивания;

φ_p — угол сдвига цепи реле.

Рабочие режимы схемы должны удовлетворять:

а) уравнению (2) дуги окружности, отсекаемой двумя прямыми, сдвинутыми друг относительно друга на угол $\varphi_\mu - \varphi_p$; граничными условиями являются: $Z_\mu = 0$, $Z_\mu = \infty$ или $Z_p = \infty$, $Z_p = 0$, при этом $I_\mu = I_{13T}$ или $I_p = I_{13T}$;

б) кривой намагничивания сердечника в области слабых полей.

Оптимальные условия работы схемы — наибольшая отдаваемая мощность или наименьший объем сердечника при заданном потреблении реле могут быть определены на основании зависимости

$$P_p = UI_p = f(B_m),$$

которая определяется при $I_{13T} = \text{const}$ для ряда значений I_μ , по кривой намагничивания, т. е. с учетом нелинейного изменения сопротивления Z_μ и соответствующих значений I_p .

Приведенные выражения, векторная диаграмма и графические построения позволяют установить для оптимальных условий связь между следующими величинами, необходимыми для расчета неразъемного трансформатора:

1) токами или сопротивлениями цепи намагничивания трансформатора и реле

$$\gamma = \frac{I_\mu}{I_{pT}} = \frac{Z_p}{Z_\mu}; \quad (3)$$

2) первичным током трогания защиты и удельными намагничивающими ампервитками

$$a\omega = \frac{I_\mu}{\pi D_{cp}} = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + 2\gamma \cos(\varphi_\mu - \varphi_p) + 1}} \cdot \frac{I_{13T}}{\pi D_{cp}}; \quad (4)$$

3) максимальной отдаваемой мощностью и мощностью намагничивания P_μ :

$$P_\mu = 4,44 B_m a \omega \mu \pi D_{cp} s f \cdot 10^{-8} = \sqrt{\gamma^2 P_{pT}^2 -}$$

где $B_m = \frac{U \cdot 10^8}{4,44 s f} \sin \varphi_\mu$ — индукция в серд.

D_{cp} — средний диаметр сердечника;

s — сечение сердечника;

f — частота;

P_a — активные потери в сердечник

Кабельные трансформаторы, предназначенные для установки на разделанных кабелях, являются разъемными. В связи с этим в соединениях сердечника появляются эквивалентные воздушные зазоры. Выражения (4) для разъемного трансформатора примут вид:

$$a\omega'_\mu = \frac{I_\mu}{\pi D_{cp}} = \frac{\gamma I_{13T}}{\sqrt{\gamma^2 + [2\gamma \cos(\varphi_\mu - \varphi_p) + 1] \pi D_{cp}}}$$

$$= a\omega_{\mu c} + a\omega_\delta \frac{2\delta_s}{\pi D_{cp}} = a\omega_{\mu c} + a\omega'_\delta,$$

где $a\omega'_\mu$ — полные намагничивающие первитки, отнесенные к сердечнику;

$a\omega_{\mu c}$ — удельные намагничивающие первитки сердечника;

$a\omega_\delta = \frac{B_m}{1,78}$ — удельные ампервитки эквивалентного воздушного зазора;

$a\omega'_\delta = a\omega_\delta \frac{2\delta_s}{\pi D_{cp}}$ — ампервитки зазора, отнесенные к длине сердечника;

δ_s — эквивалентный зазор на шихтованное соединение;

$$P_\mu = 4,44 B_m I_\mu s f \cdot 10^{-8} = 4,44 B_m \times$$

$$\times \left(a\omega_{\mu c} \pi D_{cp} + \frac{B_m}{1,78} 2\delta_s \right) s f \cdot 10^{-8},$$

Для каждого значения I_μ , а следовательно и $a\omega'_\mu$ индукция B_m может быть определена графически (рис. 4) как точка пересечения кривой $B_m = f(a\omega_{\mu c})$ и прямой $B_m = 1,78 \frac{\pi D_{cp}}{2\delta_s} a\omega'_\mu$ проведенной из точки $a\omega'_\mu$ под углом $\alpha = \arctg 1,78 \frac{\pi D_{cp}}{2\delta_s}$ к оси абсцисс [Л. 7].

Построение угла α производится по $\tg \alpha$, введенному к масштабам B_m и $a\omega$, т. е. $\tg \alpha = 1,78 \frac{\pi D_{cp}}{2\delta_s} \frac{a}{b}$, где $a = \frac{a\omega}{m_m}$, $b = \frac{B_m}{m_m}$.

Для приближенных расчетов, если не учитывать потерь и влияния начальной нелинейной части кривой намагничивания, за оптимальное может быть принято следующее условие: $Z_\mu = Z_p$, т. е. $\gamma = 1$. При этом выражения (4) примут вид:

$$a\omega_\mu = \frac{I_{13T}}{2\pi D_{cp} \cos \frac{\varphi_\mu - \varphi_p}{2}}, \quad (5)$$

$$P_\mu = P_{pT}. \quad (6)$$

Максимальная индукция находится с помощью величины $a\omega_\mu$ или $a\omega'_\mu$ по кривой намагничивания.

Если известны величины P_{pm} , φ_p , φ_μ , D_{cp} , соотношения (4), (4'), (5) и (5') дают возможность с помощью кривой намагничивания определить:

а) сечение сердечника s , если задано I_{13m} ,

$$s = \frac{\sqrt{\gamma^2 P_{pm}^2 - P_a^2} \cdot 10^3}{4,44 B_m a \omega_\mu \pi D_{cp} f} \quad (6)$$

$$s = \frac{\sqrt{\gamma^2 P_{pm}^2 - P_a^2} \cdot 10^3}{4,44 B_m \left(a \omega_\mu \pi D_{cp} + \frac{B_m}{1,78} 2\delta_s \right)}; \quad (6')$$

б) первичный ток трогания защиты I_{13m} , если дано s . В этом случае B_m и $a\omega_\mu$ для условий трогания находятся графически (рис. 4), как пересечения кривой намагничивания $B_m = f(a\omega_\mu)$ с гиперболой

$$B_m a \omega_\mu = \frac{\sqrt{\gamma^2 P_{pm}^2 - P_a^2} \cdot 10^3}{4,44 \pi D_{cp} s f}$$

неразъемного трансформатора), асимптотами которой являются оси B_m и $a\omega_\mu$, или с кривой второго порядка

$$B_m a \omega_\mu - B_m^2 \frac{2\delta_s}{1,78 \pi D_{cp}} = \frac{\sqrt{\gamma^2 P_{pm}^2 - P_a^2} \cdot 10^3}{4,44 \pi D_{cp} s f}$$

разъемного трансформатора). Подстановка численных значений B_m и $a\omega_\mu$ в выражения (4'), (4'') дает возможность вычислить токи трогания

$$I_{13m} = \frac{\sqrt{\gamma^2 + 2\gamma \cos(\varphi_\mu - \varphi_p) + 1}}{\gamma} \pi D_{cp} a \omega_\mu \quad (7)$$

$$I_{13m} = \frac{\sqrt{\gamma^2 + 2\gamma \cos(\varphi_\mu - \varphi_p) + 1}}{\gamma} \pi D_{cp} \times \left(a \omega_\mu + \frac{B_m 2\delta_s}{1,78 \pi D_{cp}} \right). \quad (7')$$

Величина s или I_{13m} может быть определена также и аналитически с помощью выражения начальной части кривой намагничивания

$$B_m = \beta \cdot a \omega_{эфф}^m, \quad (8)$$

где β и m — постоянные величины. Подставив в (8) B_m из (8) и $a\omega_\mu$ из (4), для неразъемных трансформаторов и условия $Z_\mu = Z_p$ получим:

$$s = \frac{P_{pm} \cdot 10^3 (\pi D_{cp})^m}{4,44 \beta (0,5 I_{13m})^{m+1}}, \quad (9)$$

$$I_{13m} = 2 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{P_{pm} (\pi D_{cp})^m}{4,44 s \beta}}. \quad (10)$$

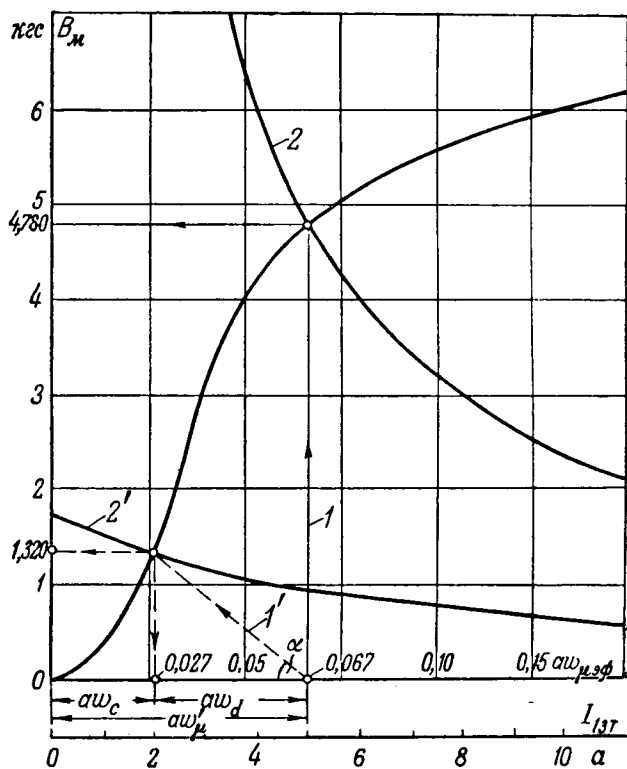


Рис. 4. Графическое вычисление B_m и $a\omega_{эфф}$ для определения сечения сердечника (прямые 1 и 1') и тока трогания (кривые 2 и 2'). Прямая 1 и кривая 2 для неразъемного трансформатора, прямая 1' и кривая 2' для разъемного трансформатора.

Например, для стали $\beta = (8, 9 \dots 25) 10^3$, $m = 1,67 \dots 1,43$. Тогда

$$I_{13m} = (12 \dots 17,5) \sqrt[2,67]{\frac{P_{pm} D_{cp}^{1,67}}{s}}. \quad (11)$$

Однако графический метод является более удобным. Применяя его, мы используем действительные кривые намагничивания материалов. Кроме того, он позволяет избежать сложных выражений для разъемных трансформаторов и не требует в каждом случае подсчета величин β и m . Последнее особенно затруднительно, если применяются сплавы типа пермаллоя, так как начальная часть кривой $B = f(a\omega)$ неодинакова для различных сортов, плавок и партий отжига пермаллоя.

Если кроме потребления реле задан его ток трогания I_{pm2} или полное сопротивление Z_{p2} , то число витков вторичной обмотки кабельного трансформатора

$$\begin{aligned} w_{m2} &= \frac{I_{13m}}{I_{pm2} \sqrt{\gamma^2 + 2\gamma \cos(\varphi_\mu - \varphi_p) + 1}} = \\ &= \frac{I_{13m}}{\sqrt{\frac{P_{pm}}{Z_{p2}^2} [\gamma^2 + 2\gamma \cos(\varphi_\mu - \varphi_p) + 1]}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Сечение провода определяется по термической устойчивости при двойном замыкании на

землю, исходя из кратности тока повреждения и вторичного тока при насыщении сердечника.

При заданном числе витков вторичной обмотки и, следовательно, известном Z_μ число витков обмотки реле

$$w_p = \frac{aw_{pm}}{\sqrt{\frac{P_{pm}}{\gamma Z_\mu}}} \quad (13)$$

где aw_{pm} — ампервитки при трогании реле.

При наличии нескольких кабельных трансформаторов, включенных параллельно (рис. 1, б), в условиях трогания защиты через каждый трансформатор протекает первичный ток

$$I_n = \frac{I_{13m}}{n},$$

где n — число кабелей.

При такой схеме работы кабельных трансформаторов и заданном I_{13m} удельные намагничивающие ампервитки уменьшаются, а сечение возрастает. В связи с этим для условий трогания вместо I_{13m} и P_{pm} в основные соотношения должны быть введены: намагничивающий ток каждого трансформатора

$$I_{n\mu} = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + 2\gamma \cos(\varphi_\mu - \varphi_p) + 1}}$$

$$I_n = \frac{\gamma I_{13m}}{\sqrt{\gamma^2 + 2\gamma \cos(\varphi_\mu - \varphi_p) \cdot n}} \quad (14)$$

и мощность намагничивания каждого трансформатора

$$P_{n\mu} = \frac{\sqrt{\gamma^2 P_{pm}^2 - n^2 P_a^2}}{n} \quad (15)$$

Тогда выражения (4), (5), (13) примут вид:

$$aw_{n\mu} = \frac{\gamma I_{13m}}{\sqrt{\gamma^2 + 2\gamma \cos(\varphi_\mu - \varphi_p) + 1} n \pi D_{cp}}, \quad (16)$$

$$P_{n\mu} = 4,44 B_m aw_{n\mu} \pi D_{cp} s_n f \cdot 10^{-8}. \quad (17)$$

Выражения (16) и (17) позволяют производить все расчеты неразъемных или разъемных трансформаторов графически или аналитически, так же как и приведенные выше расчеты одного трансформатора. Например, при наличии стального сердечника аналитическое выражение для тока трогания примет вид [Л. 5]:

$$I_{13m} = (6 \dots 8,75) (\gamma + 1) \sqrt{\frac{1,6}{\gamma} \cdot \frac{2,67}{\gamma} \frac{P_{cm} D_{cp}^{1,67}}{s_n}} \quad (18)$$

На основании соотношений (4), (14), (5), (15), (16) и (17) для схем защиты с кабельными трансформаторами тока построены кривые (рис. 5)

$$I_{n\mu} = f\left(\frac{s_n}{P_{n\mu}}\right)$$

или

$$\frac{\gamma}{n(\gamma + 1)} I_{13m} = f\left(\frac{n}{\gamma} \frac{s_n}{P_{pm} \cdot 10^{-3}}\right)$$

при $\varphi_\mu = \varphi_p$, характеризующие зависимость чувствительности защиты от сечения сердечника из различных ферромагнитных материалов заданных n , γ , P_{pm} кривые (рис. 5) дают возможность определить сечение сердечника требуемых значений I_{13m} (умножением по известной величины $\frac{s_n}{P_{n\mu}}$ на $\frac{\gamma}{n} P_{pm} \cdot 10^{-3}$) или при известном сечении s_n определить I_{13m} .

Для схем защиты с одним кабельным трансформатором ($n=1$) и при $\gamma=1$ кривые непосредственно дают зависимость

$$I_{13m} = f\left(\frac{s_n}{P_{pm}}\right).$$

Так, для тока трогания $I_{13m} = 5a$, при котором должна действовать защита генераторов, сечения разъемных сердечников из различных материалов будут иметь значения, приведенные в табл. 1.

Табл. 1
Сечения разъемных сердечников из различных материалов (см²)

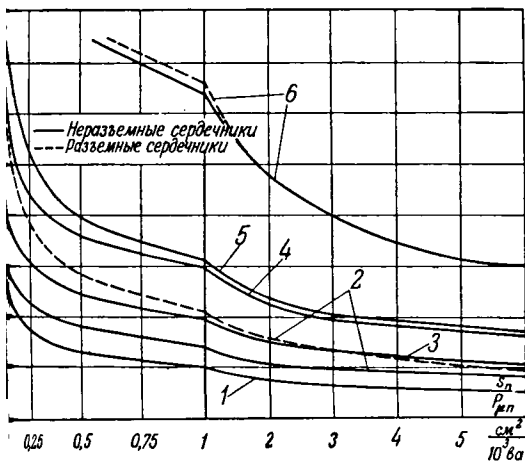
Тип реле	ЭТ-521	ЭТД-551	Реле ЦНЦ	
Максимальная отдаваемая мощность (P_{pm}), ва	$70 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	0,3
Сталь	126	21,7	5,4	0,1
45%-ый пермаллой	23,1	3,96	1	0,1
Мо-пермаллой	9,38	1,6	0,4	0,1

Табл. 1 показывает, что в случае применения реле типа ЭТ-521 размеры сердечников стали получаются довольно большими, что затрудняет выполнение равномерно распределенной обмотки. Следовательно, защита с трансформаторами, имеющими стальные сердечники требует более чувствительных реле. Защита же, в которой применены трансформаторы с сердечниками из 45%-го пермаллоя или Мо-пермаллоя, можно выполнить с любыми реле, указанными в табл. 1.

При токах трогания $I_{13m} \leq 5a$ и числе кабелей $n > 1$ сечения сердечников возрастают.

При одинаковых значениях I_{13m} , P_{pm} и D суммарное сечение сердечников при $n > 1$ больше сечения одного сердечника при $n=1$ в n^k раз. Это объясняется разветвлением тока по кабелям с уменьшением рабочей индукции в каждом сердечнике в соответствии с кривой $B=f(I)$ и отходом от оптимальных условий. Сравнение выражений для сечения одного сердечника ($n=1$) и суммарного сечения ($n>1$) при $\mu = \text{пост}$ показывает, что $k=2$, т. е. суммарное сечение возрастает пропорционально квадрату числа кабелей.

Например, в случае применения реле, имеющих $P_{pm} = 0,3 \cdot 10^{-3}$, сечения разъемных сердечников из стали для тока трогания $I_{13m} = 3a$ и числа кабелей $n=6 \dots 14$ получаются равными 20 ... 60 см².



Зависимости намагничивающего тока кабельного реле от отношения сечения сердечника к мощности реле для различных материалов.

— Мо-пермаллой (различные сорта); 4 — 45%-ный пермаллой; 5 — сталь ХВП; 6 — сталь ЭЧА.

ким образом, при параллельном включении трансформаторов со стальными сердечниками в большом числе кабелей сечения сердечников оказываются довольно большими даже при использовании чувствительных реле.

В случае применения тех же реле с $P_{pm} = 10^{-3}$ в а сечения разъемных сердечников из пермаллоя для $I_{зм} = 3$ а и $n = 6 \dots 14$ являются равными $1,5 \dots 5$ см².

Следовательно, для случаев, когда число кабелей велико, трансформаторы с сердечниками больших размеров и более точные, можно использовать, если применять в качестве материала сердечников Мо-пермаллой и пользоваться чувствительным реле.

Для весьма малых токов трогания, характерных для защиты линий, питающих торфопредприятия ($n = 1$ при $\gamma = 1$), и использовании чувствительных реле, имеющих $P_{pm} = 10^{-3}$ в а, сечения неразъемных сердечников приведены в табл. 2.

В токах $I_{зм} = 0,3$ а сердечники из сталей и из 45%-го пермаллоя получаются весьма большими. Осуществление защиты, имеющей ток трогания, с кабельными трансформаторами возможно только при использовании в качестве материала для сердечников Мо-пермаллоя. При токах трогания $I_{зм} \geq 5$ а наряду с пермаллоем могут быть использованы сталь и 45%-ный пермаллой.

Таблица 2

Сечения неразъемных сердечников из разных материалов (см²)

Материал	Сталь ЭЧА	Сталь ХВП	45%-ный пермаллой	Мо-пермаллой
$I_{зм} = 0,3$ а	403,0	55,8	54,0	10,8
$I_{зм} = 0,5$ а	112,0	15,6	15,0	3,85

Примечание. Применение стали ХВП для кабельных трансформаторов предложено Р. В. Вигдергауз в 1949 г.

Опыт эксплуатации более 20 комплектов защиты генераторов и синхронных компенсаторов с токами трогания $3 \dots 5$ а в течение трех лет и 8 комплектов защиты линий, питающих торфопредприятия, с токами трогания от 0,6 а в течение двух сезонов дал положительные результаты [Л. 8]. При этом подтвердилась возможность создания защиты высокой чувствительности для генераторов, выводы которых выполнены несколькими кабелями.

В настоящее время на основании разработок ЦНИЭЛ завод «Энергоприбор» приступил к выпуску устройств чувствительной токовой защиты от замыканий на землю.

Выводы. 1. Применение в схемах защиты от замыканий на землю кабельных трансформаторов тока с сердечниками из стали и сплавов с высокой магнитной проницаемостью, особенно из Мо-пермаллоя, и реле с малым потреблением, позволяет выполнить чувствительную защиту с токами трогания: для генераторов $2,5 \dots 5$ а (при числе кабелей до 10—15) и для линий, питающих торфопредприятия, $0,3 \dots 0,5$ а.

2. Размеры сердечников, изготовленных из Мо-пермаллоя, значительно меньше размеров сердечников из стали. Сердечники с малым сечением позволяют легко выполнить равномерно распределенную вторичную обмотку. Благодаря этому и высокой проводимости пермаллоя токи небаланса при больших кратностях первичного тока оказываются весьма малыми, что обеспечивает работу защиты с высоким коэффициентом запаса. При малых сечениях значительно облегчаются изготовление и установка сердечников.

3. Применение Мо-пермаллоя для изготовления сердечников кабельных трансформаторов оправдывается в технико-экономическом отношении: большая чувствительность защиты при таких трансформаторах уменьшает размеры повреждений оборудования и повышает бесперебойность его работы.

Литература

1. И. А. Сыромятников. Режим работы сетей с малым током замыкания на землю. Электрические станции, № 2, 1951.
2. Е. Д. Зейлидзон. Новые условия выбора чувствительности защиты от замыкания на землю генераторов. Электрические станции, № 2, 1951.
3. Г. Т. Грек. Защита от замыканий на землю с фазными трансформаторами тока. Электрические станции, № 9, 1950.
4. И. Ф. Седнев. Токовая защита от замыканий на землю с трансформаторами тока нулевой последовательности, работающая на емкостном токе. Электрические станции, № 6, 1950.
5. В. Е. Казанский. Применение трансформаторов тока нулевой последовательности с кольцевым магнитопроводом для защиты от замыканий на землю. Электрические станции, № 3, 1949.
6. И. И. Соловьев и И. Н. Попов. Чувствительная токовая защита генераторов от замыканий на землю. Электрические станции, № 6, 1949.
7. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.
8. Я. С. Гельфанд, И. Н. Попов, Г. В. Субботина. Чувствительная защита от замыканий на землю и опыт ее эксплуатации. Электрические станции, № 2, 1951.

[31. 8. 1951]

О вертикальном расстоянии между проводами в гололедных районах

Кандидат техн. наук, доц. Г. М. РОЗАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Вопрос определения вертикального расстояния между проводами в гололедных районах (III и IV) до настоящего времени не получил своего разрешения.

Действующие Правила устройства электротехнических установок не дают по этому вопросу конкретных указаний. § 90 Правил гласит: «В районах III и IV климатических условий при вертикальном расположении проводов минимальные расстояния между ними на опоре определяются по условиям сближения проводов в пролете, при неравномерной нагрузке их гололедом». Отсутствие рекомендуемой схемы неравномерной нагрузки гололедом ставит проектировщиков в затруднительное положение, вследствие чего они избегают применять в гололедных районах расположение проводов в вертикальной плоскости, увеличивая подчас стоимость сооружения линии.

На страницах журнала «Электричество» уже было высказано предложение [Л. 1] о расчетной схеме неравномерной нагрузки проводов гололедом, но, к сожалению, до настоящего времени она не вошла в Правила устройства.

Считая, что в некоторых случаях расположение проводов в вертикальной плоскости в гололедных районах может дать значительный экономический эффект, автор проанализировал этот вопрос и пришел к определенным выводам.

Влияние числа пролетов между анкерными опорами на вертикальное расстояние между проводами. Для анализа взята линия напряжением 110 кВ со сталеалюминиевыми проводами марки АС-95 с длиной пролета 175 м, проходящая в местности с климатическими условиями, соответствующими IV району гололедности. Минимально допускаемое расстояние между проводами в пролете при неравномерной нагрузке принято равным 1,1 м. Число пролетов между анкерными опорами взято различное, а именно: 3, 5, 7 и 9 пролетов.

Схема неравномерной нагрузки проводов гололедом следующая (рис. 1): верхний провод линии загружен гололедом наибольшей интенсивности, на нижнем проводе в среднем пролете гололед отсутствует, на нижнем проводе в других пролетах гололед сохранился полностью. Эту

Анализируется влияние числа пролетов между анкерными опорами, длины пролетов, марки проводов и гололедности района на величину вертикального расстояния между проводами. Рекомендуется расчетная схема неравномерной нагрузки проводов гололедом. Приводится числовой пример, дающий представление о методе определения вертикального расстояния между проводами. Печатается в порядке обсуждения.

схему в дальнейшем называть схемой

С помощью графоаналитического метода предложенного А. А. Г. вым для расчета равномерной нагрузки проводов [Л. 2],

найлены напряжения и стрелы провеса этого провода в средних пролетах. Затем найлены вертикальные расстояния между проводами при синхронном отклонении проводов под действием ветра.

Результаты расчетов приведены в табл.

Табл

Число пролетов	3	5	7
Вертикальное расстояние между проводами, м . .	7,2	7,32	7,35

Из табл. 1 следует, что число пролетов между анкерными опорами почти не влияет на вертикальное расстояние между проводами, поэтому в дальнейшем в целях упрощения расчетов принято пять пролетов между анкерными опорами.

Влияние длины пролета на вертикальное расстояние между проводами. Были взяты три длины пролета: 125, 150 и 175 м. Исходные данные приняты такие же, как и в предыдущем случае (провод АС-95 и т. д.). С помощью того же графоаналитического метода были получены величины вертикальных расстояний между проводами, приведенные в табл. 2.

Табл. 2

Длины пролетов, м	125	150	175
Вертикальное расстояние между проводами, м	4,38	5,77	7,3

Как следует из табл. 2, с ростом длины пролета значительно увеличивается вертикальное расстояние между проводами.

По данным табл. 2 построена кривая (рис. 2) путем экстраполяции этой кривой в сторону уменьшения длины пролета найдено, что минимальное вертикальное расстояние между про

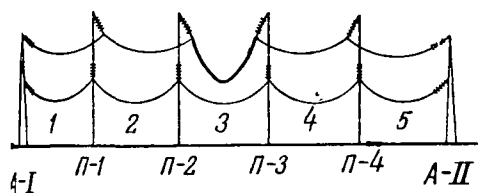


Рис. 1.

3,1 м, которое принято при сооружении 110 кВ во II районе гололедности, соответствующей длине пролета $l \leq 125$ м.

Помимо того, было весьма интересно рассмотреть влияние длины пролета на вертикальное расстояние между проводами и при другой схеме равномерной нагрузки проводов гололедом, а именно: нижний провод полностью свободен от гололеда, верхний провод в среднем пролете имеет наибольшую толщину стенки гололеда, а в остальных пролетах — как этот провод во всех других пролетах, свободен от гололеда (рис. 3). Эту схему можно называть схемой 2.

Как показали графоаналитические расчеты, в тех же самых (за исключением схемы) исходных условиях для пролетов 125 и 150 м вертикальное расстояние между проводами увеличилось на 0,7...0,8 м, т. е. схема 2 является более выгодной, чем схема 1.

По нашему мнению, загрузка проводов гололедом по схеме 2 является менее вероятной, чем по схеме 1, так как трудно себе представить, чтобы гололед наибольшей интенсивности сохранялся только на верхнем проводе в одном из пролетов, в то время как на верхнем и нижнем проводах во всех других пролетах гололед полностью отсутствовал. Большая вероятность случайной загрузки проводов гололедом по схеме 1 можно объяснить тем, что при изменении метеорологических условий сброс гололеда происходит сначала на проводе в одном из пролетов. Поэтому все дальнейшие расчеты и выводы были применены к схеме 1.

Влияние марки проводов на вертикальное расстояние между проводами. Этот вопрос был рассмотрен применительно к стальноалюминиевым проводам марок АС-95 и АС-185. В целях приведения к одинаковым условиям для проводов была принята длина пролета 175 м, для провода АС-185 — 210 м. В этом случае провиса проводов приближаются друг к другу. Район гололедности принят IV. В расчете была принята возможность несинхронного качания проводов под действием ветра, что дает несколько большие расстояния между проводами. Кроме того, в схеме 1 загрузка среднего пролета нижнего провода принималась различной, а именно: толщина гололеда принималась равной 25, 50 и 75 % веса гололеда.

Вода для гололедности располагалась строго в вертикальной плоскости, т. е. провод находился над проводом. Сдвиг проводов на 0,5 м при расположении их на двухцепных опорах в виде «обратной елки» давал приблизительно совпадающие результаты. Это об-

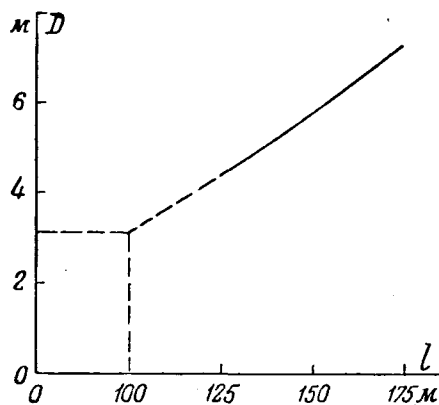


Рис. 2.

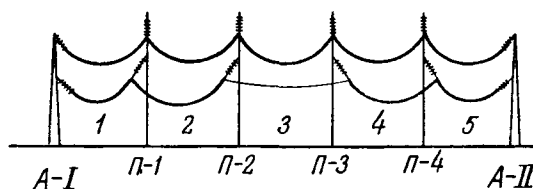


Рис. 3.

стоятельство отмечается также и в [Л. 1]. Все другие исходные положения были приняты такие же, как и в предыдущих случаях.

В результате графоаналитического решения были получены вертикальные расстояния между проводами в метрах, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Степень загрузки гололедом нижнего провода среднего пролета в % (IV район гололедности) . .	0	25	50	75	100
Провод АС-95, длина пролета 175 м	7,4	5,5	3,8	3,1	3,1
Провод АС-185, длина пролета 210 м	6,65	4,95	3,6	3,1	3,1

Примечание. При загрузке гололедом нижнего провода среднего пролета 75 и 100% веса гололеда расстояния между проводами в пролете получались равными: для провода марки АС-95 — 1,8 и 3,1 м, для провода марки АС-185 — 2 и 3,1 м.

Из табл. 3 следует, что степень загрузки гололедом нижнего провода в среднем пролете существенно влияет на вертикальное расстояние между проводами. Как и следовало ожидать, при провисе большей марки расстояние уменьшается.

Для сравнения были приведены аналогичные расчеты для провода марки АС-95 и II района гололедности. Длина пролета была принята равной 250 м.

Во II районе гололедности широко применяются двухцепные металлические опоры с вертикальным расстоянием между проводами — 3,1 м. Провода расположены «обратной елкой» с горизонтальным сдвигом их относительно друг друга ~ 0,75 м. Как показывает опыт эксплуатации этих линий, никаких ненормальностей при сбросах гололеда не наблюдалось.

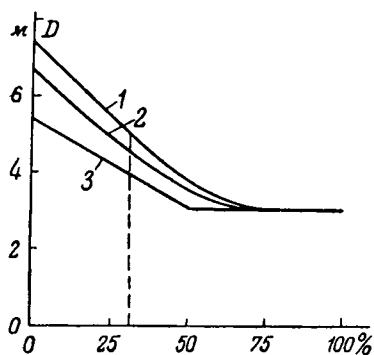


Рис. 4.

1 — АС-95, $l=175$ м, IV район; 2 — АС-185, $l=210$ м, IV район; 3 — АС-95, $l=250$ м, II район

Результаты подсчетов для последнего случая приведены в табл. 4.

Таблица 4

Степень загрузки гололедом нижнего провода среднего пролета в % (II район гололедности) . .	0	25	50	75	100
Провод АС-95, длина пролета 250 м	5,4	4,25	3,1	3,1	3,1

Примечание. При загрузке гололедом нижнего провода среднего пролета 75 и 100% веса гололеда расстояния между проводами в пролете получились равными 2,3 и 3,1 м.

Из табл. 4 следует, что если принять согласно схеме 1 нижний провод в среднем пролете совершенно свободным от гололеда, то вертикальное расстояние между проводами следовало бы принять равным 5,4 м, т. е. значительно большим, чем расстояние 3,1 м, оправдавшее себя на практике. Расстояние между проводами 3,1 м соответствует загрузке нижнего провода в среднем пролете равной ~ 50% веса гололеда.

Учитывая некоторую условность отнесения существующих линий 110 кВ ко II району гололедности, в целях создания запаса для линий, проходящих в гололедных районах, допустимо принять загрузку гололедом нижнего провода в среднем пролете равной 30...35% полного веса гололеда.

По данным табл. 3 и 4 построены кривые (рис. 4), из которых видно, что при загрузке гололедом нижнего провода в среднем пролете, равной 30% полного веса гололеда, вертикальное расстояние между проводами возможно принять (IV район гололедности) для провода марки АС-95 — 5 м, для провода марки АС-185 — 4,5 м.

Рассматривая кривые (рис. 4), относящиеся к проводу АС-95 и II и IV районам гололедности, можно сделать заключение, что вертикальное расстояние между проводами для III района гололедности будет находиться как среднее между значениями для II и IV районов.

Проведенный анализ относился к статическому состоянию проводов. При внезапном сбросе гололеда нижний провод может подпрыгнуть и прикоснуться к верхнему проводу. Чтобы избежать захлестывания, необходимо применять располо-

жение проводов в виде «обратной елки» и зондальным сдвигом их относительно друг друга равным 0,75...1 м.

Выводы. 1. При определении вертикального расстояния между проводами необходимо брать первую схему неравномерной нагрузки проводов гололедом, а именно: верхний пролет загружен гололедом наибольшей интенсивностью, нижнем проводе в среднем пролете гололед составляет 30...35% от полного веса гололеда, в этом проводе в других пролетах гололед не является полностью.

2. Поскольку вертикальное расстояние между проводами в сильной степени зависит от марки провода, длины пролета и района гололедности, то расчеты должны быть проведены для каждого конкретного случая, пользуясь при этом аналитическим методом [Л. 2].

3. В гололедных районах (III и IV) можно применять расположение проводов на схеме в виде «обратной елки» с горизонтальным сдвигом их относительно друг друга равным 0,75...1 м.

Пример. Требуется определить вертикальное расстояние между проводами для линии 110 кВ со стандартными проводами марки АС-185, проходящей в IV районе гололедности. Номинальный коэффициент запаса прочности проводов принят равным 2. Длина пролета 210 м. Степень загрузки гололедом нижнего провода в среднем пролете принята равной 25% полного веса гололеда.

По известным формулам подсчитываем удельные нагрузки провода для двух случаев: 1) загрузка проводов гололедом равна 100% веса гололеда; 2) загрузка проводов равна 25% веса гололеда. Результаты подсчетов даны в табл. 5.

Табл.

Удельные нагрузки провода, кг/м м.м ²	При загрузке провода гололедом равной	
	100% веса гололеда	25% веса гололеда
От собственного веса провода	$g_1 = 3,58 \cdot 10^{-3}$	$g'_1 = 3,58 \cdot 10^{-3}$
От веса гололеда	$g_2 = 10,13 \cdot 10^{-3}$	$g'_2 = 2,54 \cdot 10^{-3}$
От собственного веса провода и веса гололеда	$g_3 = 13,71 \cdot 10^{-3}$	$g'_3 = 6,12 \cdot 10^{-3}$
От давления ветра при гололеде	$g_5 = 3,88 \cdot 10^{-3}$	$g'_5 = 2,23 \cdot 10^{-3}$
От собственного веса провода, веса гололеда и давления ветра при гололеде	$g_7 = 14,25 \cdot 10^{-3}$	$g'_7 = 6,5 \cdot 10^{-3}$

Затем находим напряжение и стрелы провеса нижнего провода в среднем пролете при неравномерной нагрузке проводов гололедом по схеме 1. Напряжение проводов определяем путем построения четырех кривых (рис. 5): кривые 1 и 2 выражают зависимость натяжения проводов от длины пролета $T=f(l)$, а кривые 3 и 4 — зависимость отклонения гирлянды изоляторов от разницы натяжений проводов $\delta=f(\Delta T)$.

Задаваясь уменьшением длины пролета, строим кривую 1 (рис. 5) по формуле

$$T_1 = s \sqrt{\frac{P^2 g_7^2}{24(L_0 - l)}}$$

s — общее сечение провода, мм^2 . Здесь s равно сумме площадей сечений алюминия и стали, $s = 219 \text{ мм}^2$; l — длина пролета, м ; g_7 — результирующая удельная нагрузка при 100% гололеда, $g_7 = 14,25 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м мм}^2$; L_0 — длина провода в пролете при гололеде 100%

$$L_0 = l + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{l}$$

то

$$f = \frac{l^2 g_7}{8 \sigma_7} = \frac{210^2 \cdot 14,25 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10} = 7,85 \text{ м.}$$

кратительно,

$$L_0 = 210 + \frac{8}{3} \cdot \frac{7,85^2}{210} = 210,782 \text{ м.}$$

Числовые величины, по которым построена кривая 1 (рис. 5), приведены в табл. 6.

Таблица 6

длина пролета, м	210	209,8	209,6	209,4	209,2	209
напряжение про- вода, кг . . .	2 190	1 950	1 770	1 640	1 530	1 445

Задаваясь увеличением длины пролета, строим кривую 2 (рис. 5) по аналогичной формуле (1)

$$T_2 = s \sqrt{\frac{l^3 (g'_7)^2}{24 (L'_0 - l)}}$$

g'_7 — результирующая удельная нагрузка при 25% гололеда;

$$g'_7 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м мм}^2;$$

L'_0 — длина провода в пролете при 25%-ном гололеде

$$L'_0 = l + \frac{8}{3} \cdot \frac{(f')^2}{l}$$

$$f' = \frac{l^2 g'_7}{8 \cdot \sigma_7} = \frac{210^2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 4,97} = 7,2 \text{ м.}$$

97 кг/мм² было найдено по удельной нагрузке

$$g'_7 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м мм}^2.$$

$$L_0 = 210 + \frac{8}{3} \cdot \frac{7,2^2}{210} = 210,65 \text{ м.}$$

Другие обозначения такие же, как и для кривой 1. Числовые, по которым построена кривая 2 (рис. 5), приведены в табл. 7.

Таблица 7

длина пролета, м	210	210,1	210,2	210,3	210,4	210,5
напряжение про- вода, кг . . .	1 090	1 180	1 305	1 470	1 740	2 220

Кривая 3 (рис. 5) строится по формуле (2)

$$\delta_3 = \frac{\lambda \Delta T}{\sqrt{\left(P + \frac{Q}{2}\right)^2 + \Delta T^2}}, \quad (2)$$

λ — длина гирлянды изоляторов, м ($\lambda = 1,45 \text{ м}$); P — результирующая нагрузка при 100% гололеда

$$P = g_7 s l = 14,25 \cdot 10^{-3} \cdot 219 \cdot 210 = 655 \text{ кг};$$

Q — вес гирлянды изоляторов, кг ($Q = 50 \text{ кг}$);

ΔT — разность натяжения проводов в смежных пролетах, кг .

Задаваясь значением ΔT , определяем δ_3 .

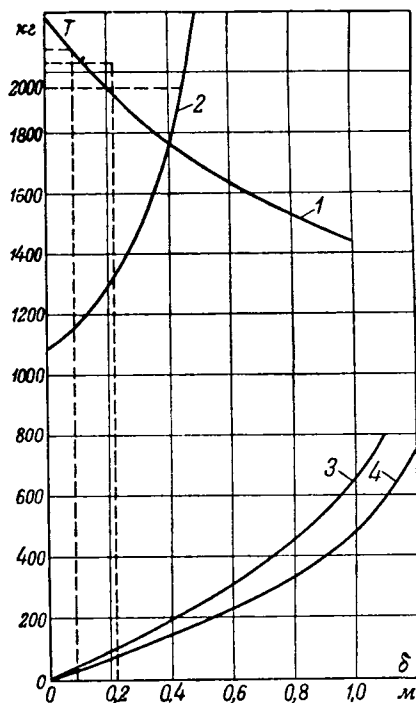


Рис. 5.

Числовые значения, по которым построена кривая 3, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Разность натяжений проводов, кг	100	200	400	600	800
Отклонение гирлянды изоляторов, м	0,211	0,408	0,735	0,96	1,1

Кривая 4 (рис. 5) строится по формуле, аналогичной формуле (2).

$$\delta_4 = \frac{\lambda \Delta T}{\sqrt{\left(P' + \frac{Q}{2}\right)^2 + \Delta T^2}},$$

где P' — результирующая нагрузка при 25 и 100% гололеда

$$P' = \frac{1}{2} s l (g'_7 + g_7) = \frac{1}{2} \cdot 219 \cdot 210 (6,5 \cdot 10^{-3} + 14,25 \cdot 10^{-3}) = 476 \text{ кг.}$$

Другие обозначения такие же, как и для кривой 3.

Данные, по которым построена кривая 4, приведены в табл. 9.

Таблица 9

Разность натяжений проводов, кг	100	200	400	600	800
Отклонение гирлянды изоляторов, м . . .	0,283	0,536	0,905	1,11	1,225

Задаваясь натяжением в первом пролете нижнего провода (рис. 1), добиваемся, чтобы увеличение длины среднего пролета равнялось сумме двух отклонений гирлянды изоляторов на опорах 2 и 3 [Л. 2]. В данном случае (при числе пролетов между анкерными опорами, равном 5)

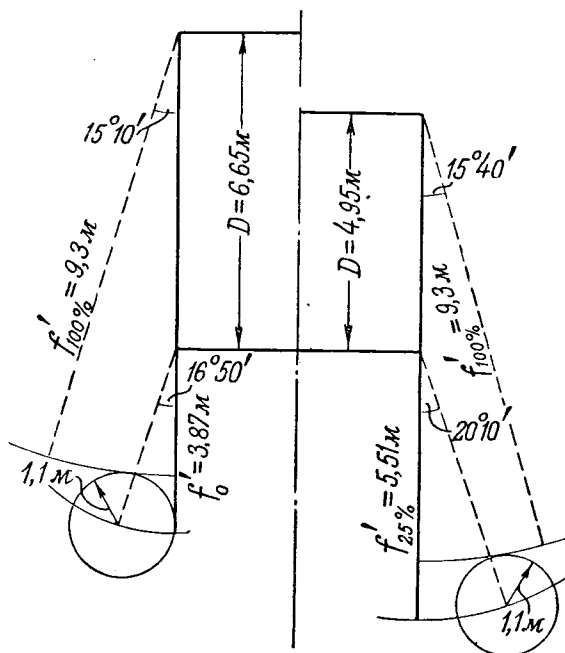


Рис. 6.

это достигается при натяжении нижнего провода в среднем пролете, равном 1950 кг (рис. 5).

Определив напряжение в проводе

$$\sigma = \frac{T}{s} = \frac{1950}{219} = 8,9 \text{ кг/мм}^2,$$

находим стрелу провеса провода

$$f'_{25\%} = \frac{210 \cdot 45^2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 8,9} = 4,06 \text{ м.}$$

Стрела провеса при 100% гололеда была найдена

$$f'_{100\%} = 7,85 \text{ м.}$$

Для определения вертикального расстояния между проводами найдем предельные углы отклонения проводов под действием ветра. Они определяются по отношению удельных нагрузок

$$\sin \alpha_{25\%} = \frac{g'_5}{g'_7} \text{ и } \sin \alpha_{100\%} = \frac{g_5}{g_7}.$$

Для нижнего провода $\sin \alpha_{25\%} = 0,345$, $\alpha_{25\%} = 20^\circ 10'$

Для верхнего провода $\sin \alpha_{100\%} = 0,27$, $\alpha_{100\%} = 15^\circ 40'$

Учтя длину гирлянды изоляторов ($\lambda = 1,45 \text{ м}$), найдем проекцию нижнего провода с гирляндой изоляторов (рис. 6) ($f'_{25\%} = 4,06 + 1,45 = 5,51 \text{ м}$).

Отложив минимально допускаемое расстояние между проводами в отклоненном положении нижнего провода равное 1,1 м, находим по проекции верхнего провода гирлянды изоляторов ($f'_{100\%} = 7,85 + 1,45 = 9,3 \text{ м}$) вертикальное расстояние между проводами. В данном случае оно равно 4,95 м (рис. 6 справа от оси).

Как было показано выше, это расстояние может быть снижено до 4,5 м, если принять степень загрузки нижнего провода равным 30% полного веса гололеда.

На рис. 6 слева от оси показано необходимое расстояние между проводами $D = 6,85 \text{ м}$ при полном отложении гололеда на среднем пролете нижнего провода.

Литература

1. О. Г. Вексельман. Выступление в дискуссионном клубе по Правилам устройства электротехнических установок. Электричество, № 8, 1950.
2. А. А. Глазунов. Линии электропередачи. Гостехиздат, 1928.

[25. 9. 54]

Аналитический способ расчета разомкнутых сетей со стальными проводами

Кандидат техн. наук В. К. ПЛЮГАЧЕВ

Московский институт механизации и электрификации сельского хозяйства им. Молотова

Вследствие небольших плотностей сельскохозяйственных нагрузок и малого числа часов использования максимума применение стальных проводов в условиях сельской электрификации вполне оправдывает себя и технически и экономически. Поэтому стальные провода нашли широкое применение при строительстве сельских электросетей и рекомендуются рядом директивных указаний.

Однако до настоящего времени отсутствует аналитический метод нахождения сечения стальных проводов даже для простейшего случая линии с одной нагрузкой на конце. В практике проектирования определение сечения стальных проводов производится все еще путем подбора, несмотря на то, что в последнее время был пред-

лагается приближенная зависимость между потерей напряжения и сечением стальных проводов, на основании которой предлагается применять существующий метод расчета электросетей на минимум металла к сетям, выполненным стальными многопроволочными проводами

ложен ряд номограмм облегчающих решение этой задачи и позволяющих графическим путем определить величину сечения стальных проводов

Установление надежного аналитического метода определения сечений стальных проводов уже само по себе представляет практический и теоретический интерес. Но кроме этого оно создает предпосылку для решения других важных задач проектирования и расчета электрических сетей со стальными проводами. В частности установление аналитической зависимости между потерей напряжения и сечением стальных проводов позволяет разработать метод расчета сетей со стальными проводами на минимум металла которого до настоящего времени не имелось. Настоящая работа представляет собой попытку

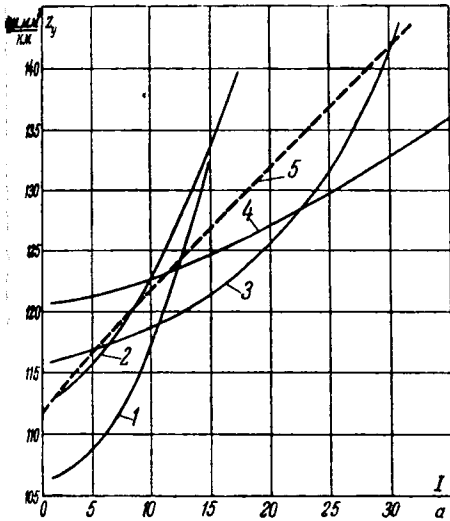


Рис. 1. Зависимость полного удельного расчетного сопротивления стальных многопроволочных проводов от тока при $\cos \varphi = 0,7$.

1 — $s = 25 \text{ мм}^2$; 2 — $s = 35 \text{ мм}^2$; 3 — $s = 50 \text{ мм}^2$; 4 — $s = 70 \text{ мм}^2$; 5 — прямая средних значений $z_y = z_{y0} + kI$.

дать аналитический метод расчета разомкнутых сетей со стальными проводами.

Разделение сечения медных и алюминиевых проводов по заданной величине потери напряжения, как известно, на малой зависимости от внешнего индуктивного сопротивления провода. Стальные же провода помимо этого обладают значительным внутренним индуктивным сопротивлением, часто превосходящим по величине внешнее. Кроме того, внутреннее индуктивное и активное сопротивления проводов являются функциями тока.

При расчете электрических сетей при нормальных режимах не нужно брать широкий диапазон характеристик стальных проводов. Для расчета можно достаточно ограничиться лишь теми характеристиками, которые соответствуют токам, имеющимся на практике.

Плотности тока для стальных проводов находятся в пределах $0,35 \dots 0,45 \text{ А/мм}^2$. По условиям потери напряжения на практике приходится принимать значительно меньшие плотности тока, лежащие в пределах $0,1 \dots 0,2 \text{ А/мм}^2$. При плотности тока в $0,45 \text{ А/мм}^2$ и напряжении, не превышающей 5%, пропускная способность линии 6 и 10 кВ со стальными проводами составляет $3 \dots 5 \text{ км}$. Средняя же длина хозяйственных линий 6 и 10 кВ равна $1 \dots 2 \text{ км}$. Поэтому верхний предел плотности тока для стальных проводов при нормальных режимах работы сетей равен $0,45 \dots 0,50 \text{ А/мм}^2$. В дальнейшем рассмотрении рабочих режимов сетей мы и будем исходить из этого значения.

Значения активного и внутреннего индуктивного сопротивления стальных проводов в зависимости от тока нами взяты из нового ГОСТ на стальные многопроволочные провода для воздушных электрических линий. Внешнее индук-

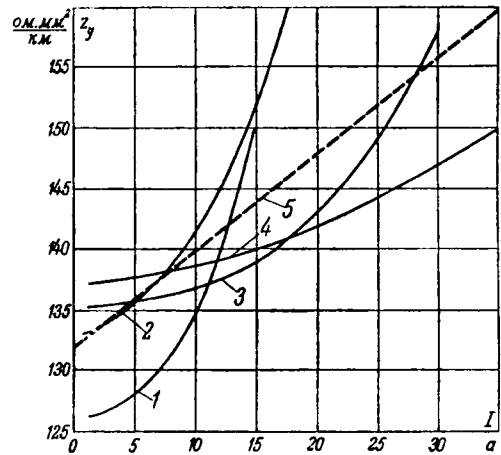


Рис. 2. Зависимость полного удельного расчетного сопротивления стальных многопроволочных проводов от тока при $\cos \varphi = 0,9$.

1 — $s = 25 \text{ мм}^2$; 2 — $s = 35 \text{ мм}^2$; 3 — $s = 50 \text{ мм}^2$; 4 — $s = 70 \text{ мм}^2$; 5 — прямая средних значений $z_y = z_{y0} + kI$.

тивное сопротивление во всех случаях определялось, исходя из расстояния между проводами, равного 1 м. Для сечений 25, 35, 50 и 70 мм² оно принято соответственно равным 0,37; 0,35; 0,34 и 0,33 Ом/км.

В настоящей работе рассмотрение ограничено распределительными сетями напряжением 6 и 10 кВ с многопроволочными стальными проводами.

Потеря напряжения в линиях со стальными проводами определяется, как известно, выражением

$$\Delta U = \sqrt{3} I (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi), \quad (1)$$

где

ΔU — потеря напряжения;

I — ток, протекающий в линии;

r_0 — активное сопротивление линии, зависящее от тока;

$x_0 = x'_0 + x''_0$ — внешнее и внутреннее индуктивное сопротивление линии, также зависящее от тока;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности нагрузки.

Обозначим величину $(r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi)$ через z_p и назовем ее расчетным сопротивлением стальных проводов при данном значении $\cos \varphi$. Умножив z_p на теоретическое сечение, взятое из стандартной шкалы многопроволочных стальных проводов, получим величину

$$z_y = (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) s. \quad (2)$$

Назовем z_y полным удельным расчетным сопротивлением стальных проводов. На рис. 1 и 2 представлены зависимости z_y от тока для стальных проводов некоторых сечений и для $\cos \varphi = 0,7$ и $0,9$.

Если между крайними точками кривых $z_y = f(I)$ провести среднюю линию, то нетрудно убедиться, что отклонение значений удельных расчетных сопротивлений от среднего значения при плотностях тока до $0,5 \text{ А/мм}^2$ не превы-

шает 10%¹. Учитывая, что разница между соседними значениями стандартных сечений стальных проводов равна примерно 30 ... 40%, проведенную линию можно принять с достаточной для практических целей точностью за прямую средних значений удельного расчетного сопротивления стальных проводов при данном $\cos \varphi$. В результате для z_y получаем следующее выражение:

$$z_y = z_{y_0} + kI, \quad (3)$$

где z_{y_0} — отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат и соответствующий полному удельному расчетному сопротивлению при токе, равном нулю;

k — тангенс угла наклона прямой средних значений z_y к оси абсцисс.

Потеря напряжения в линии с помощью формулы (3) выразится следующим образом:

$$\Delta U = \frac{V \sqrt{3} I l (z_{y_0} + kI)}{s}. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет получить формулу для определения сечения стальных проводов

$$s = \frac{V \sqrt{3} I l z_y}{\Delta U}. \quad (5)$$

Значения z_{y_0} и k для разных $\cos \varphi$ даны в таблице.

$\cos \varphi$	z_{y0}	k
0,7	112	1,0
0,8	122	0,9
0,9	132	0,8
1,0	132	0,7

Для промежуточных значений $\cos \varphi$, z_{y_0} и k определяются путем линейной интерполяции.

Сельскохозяйственные распределительные сети являются, как правило, многоступенчатыми и разветвленными. Поэтому правильное распределение допустимой потери напряжения по отдельным участкам сети, приводящее к наименьшей затрате металла, является важнейшей технико-экономической задачей рационального проектирования таких сетей.

Однако в отношении сетей со стальными проводами до настоящего времени не предложено какого-либо метода, который позволял бы решить эту задачу. Между тем для сельскохозяйственных сетей необходимость расчетов на минимум металла более настоятельна и актуальна, чем для городских или промышленных сетей, еще и потому, что решающим фактором при их проектировании является потеря напряжения.

Полученная выше зависимость между потерей напряжения и сечением стальных проводов дает возможность рассчитывать многоступенчатые и разветвленные сети на минимум металла.

Рассмотрим линию с несколькими нагрузками (рис. 3). В отличие от обычно принятого, который заключается в исключении потерь напряжения в индуктивном сопротивлении и в расчете по отдельным участкам допустимой потери напряжения от активных токов, мы можем сделать задачу несколько проще, поскольку формула (5) связывает общую потерю напряжения в линии с полным сопротивлением стальных проводов.

Как обычно, полагаем, что величины ΔU_2 и $\Delta U_{дон} - \Delta U_1 - \Delta U_2$ нам известны. Сечения стальных проводов отдельных участков линии выразятся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= \frac{V \sqrt{3} I_1 l_1 (z_{y_{01}} + kI_1)}{\Delta U_1}, \\ s_2 &= \frac{V \sqrt{3} I_2 l_2 (z_{y_{02}} + kI_2)}{\Delta U_2}, \\ s_3 &= \frac{V \sqrt{3} I_3 l_3 (z_{y_{03}} + kI_3)}{\Delta U_{дон} - \Delta U_1 - \Delta U_2}. \end{aligned} \right\}$$

Дальнейшее решение задачи производится аналогично тому, как это делается для медных и алюминиевых проводов.

В результате находим следующее распределение допустимой потери напряжения по отдельным участкам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1 &= \Delta U_{дон} \frac{V \sqrt{3} I_1 l_1}{\sum V \sqrt{3} I_y l_y}, \\ \Delta U_2 &= \Delta U_{дон} \frac{V \sqrt{3} I_2 l_2}{\sum V \sqrt{3} I_y l_y}, \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta U_n &= \Delta U_{дон} \frac{V \sqrt{3} I_n l_n}{\sum V \sqrt{3} I_y l_y}. \end{aligned} \right\}$$

Рассмотрим разветвленную сеть, изображенную на рис. 4. Необходимо найти наиболее выгодное с точки зрения затраты металла распределение допустимой потери напряжения между участком L_1 и участками L_2 и L_3 .

Пользуясь формулами (3) и (5), находим выражения для сечений проводов отдельных участков в зависимости от потери напряжения. После чего, так же как и в предыдущем случае, определяем величину потери напряжения на участке L_1 :

$$\Delta U_1 = \frac{\Delta U_{дон}}{1 + \sqrt{\frac{L_2 \sum_2 I l z_y + L_3 \sum_3 I l z_y}{L_1 \sum_1 I l z_y}}}.$$

Формулы (7) и (8) являются теми расчетными формулами, которые позволяют найти наиболее выгодное распределение допустимой потери напряжения по отдельным участкам сети со стальными проводами. Пользуясь полученными таким образом величинами потери напряжения, определяем по формуле (5) необходимое сечение проводов каждого участка линии.

¹ При обычных плотностях тока, лежащих в пределах 0,15 ... 0,30 а/мм², отклонения в подавляющем числе случаев не будут превышать 5%.

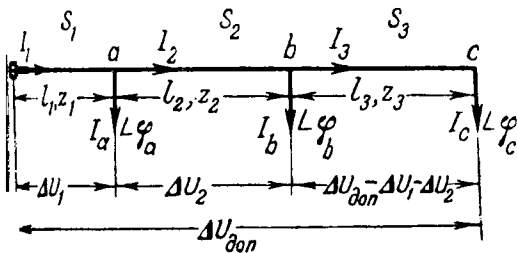


Рис. 3.

Во всех случаях, когда рабочие плотности, найденные по условию потери напряжения, являются меньше установленных экономичных плотностей тока (а для сельскохозяйственных сетей со стальными проводами это место почти всегда), то определенные выше способом сечения стальных проводов являются оптимальными.

В некоторых случаях головные участки сети выполняются проводами из цветного металла, а стальная ее часть — стальными проводами. Имеет место тогда, когда сечения стальных проводов получаются слишком большими.

Однако до решения вопроса о применении проводов из цветных металлов следует проверить возможность выполнения всей сети стальными проводами. Для этого необходимо найти значение допускаемой потери напряжения отдельным участком по формулам (7) в предположении, что вся сеть выполнена стальными проводами, а затем по формуле (5) найти сечения.

Если сечения головных участков получаются слишком большими и стальные провода применять нельзя, из величин потери напряжения этих участков исключается реактивная составляющая. Сечение проводов из цветного металла определяется по формуле

$$s_1 = \frac{\sqrt{3} I_{a1} \rho_1 l_1}{\Delta U_{a1}}.$$

Ввиду того, что найденное сечение округляется до стандартного значения, фактическая потеря напряжения $\Delta U'_1$ может отличаться от расчетной на величину

$$\Delta U_1 = \Delta U_1 - \Delta U'_1,$$

которая распределяется по остальным участкам пропорционально ΔU_2 , ΔU_3 , ΔU_4 и т. д.

В тех случаях, когда вопрос о применении стальных участков сети проводов из цветного металла является предпрешенным, рациональное распределение потери напряжения между этими участками смешанной сети может найдено с помощью видоизмененных формул (8).

Предположим, что участок I сети (рис. 3) выполнен проводами из цветного металла, а остальные участки стальными. После исключения реактивной составляющей потери напря-

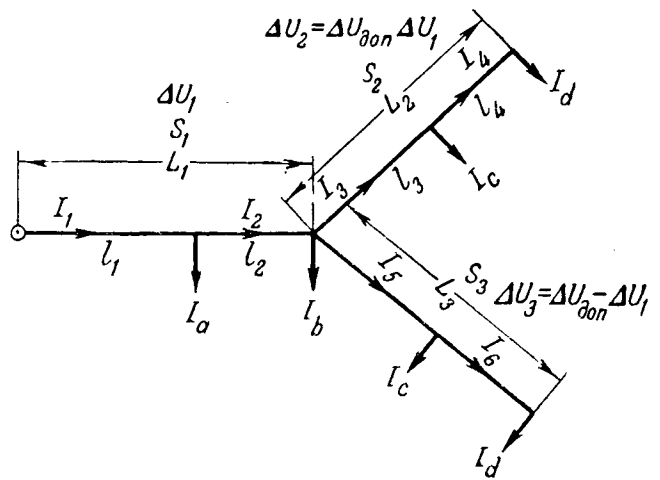


Рис. 4.

жения на участке I общая величина допускаемой потери напряжения составит:

$$\Delta U'_{дон} = \Delta U_{дон} - \Delta U_{r1}.$$

Тогда объем металла, необходимый для всех участков сети,

$$V = \frac{3 \sqrt{3} I_{a1} \rho_1 l_1^2}{\Delta U_{a1}} + \frac{3 \sqrt{3} I_2 z_{y2} l_2^2}{\Delta U_2} + \frac{3 \sqrt{3} I_3 z_{y3} l_3^2}{\Delta U'_{дон} - \Delta U_{a1} - \Delta U_2}.$$

Хотя удельные веса металла различны, для получения распределения потери напряжения, соответствующего минимуму металла, нет необходимости приводить к одному эквивалентному весу металл участка I и металл других участков, так как удельное сопротивление является функцией сечения, а не веса.

Взяв частные производные от объема по переменным ΔU_{a1} и ΔU_2 и приравняв их нулю, после некоторых преобразований находим:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{a1} &= \Delta U'_{дон} \frac{\sqrt{3} I_{a1} \rho_1 l_1}{\sqrt{I_{a1} \rho_1 l_1 + \sum \sqrt{I_{zy} l}}}, \\ \Delta U_2 &= \Delta U'_{дон} \frac{\sqrt{3} I_2 z_{y2} l_2}{\sqrt{I_{a1} \rho_1 l_1 + \sum \sqrt{I_{zy} l}}}, \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta U_n &= \Delta U'_{дон} \frac{\sqrt{3} I_n z_{yn} l_n}{\sqrt{I_{a1} \rho_1 l_1 + \sum \sqrt{I_{zy} l}}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Для случая разветвленной смешанной сети (рис. 4) можно аналогичным образом показать, что потеря напряжения должна определяться по формуле

$$\Delta U_{a1} = \frac{\Delta U'_{дон}}{1 + \sqrt{\frac{L_2 \sum_2 I_{zy} l + L_3 \sum_3 I_{zy} l}{L_1 \sum_1 I_{\rho l}}}}. \quad (10)$$

Однако по отношению к сети, часть участков которой выполнена проводами из цветного ме-

талла, а другая стальными проводами, предлагаемый нами метод не отражает полностью экономическую сторону вопроса. Для таких сетей более правильными будут решения, соответствующие минимуму стоимости металла проводов или общему минимуму стоимости сооружения сети.

Приложение. Пример. Рассчитать многоступенчатую сеть (рис. 3) на минимум металла при следующих данных:

$$W_a = 180 - j75 \text{ кВА}; \quad I_1 = 2,8 \text{ км};$$

$$W_b = 60 - j42 \text{ кВА}; \quad I_2 = 4 \text{ км};$$

$$W_c = 70 - j38 \text{ кВА}; \quad I_3 = 6 \text{ км}.$$

Напряжение сети 10 кВ, допускаемая потеря напряжения 6%.

1. Токи, протекающие по отдельным участкам сети:

$$I_1 = 17,9 - j8,96 \text{ а}; \quad \cos \varphi_1 = 0,89;$$

$$I_2 = 7,54 - j4,62 \text{ а}; \quad \cos \varphi_2 = 0,85;$$

$$I_3 = 4,05 - j2,2 \text{ а}; \quad \cos \varphi_3 = 0,87.$$

2. Пользуясь данными табл. 1, определяем полные удельные расчетные сопротивления отдельных участков линии:

$$z_{y1} = 147,3;$$

$$z_{y2} = 133,5;$$

$$z_{y3} = 132,9.$$

3. С помощью формулы (7) находим допускаемую потерю по участкам линии:

$$\Delta U_1 = 600 \frac{\sqrt{20,1 \cdot 147,3 \cdot 2,8}}{\sqrt{20,1 \cdot 147,3 \cdot 2,8} + \sqrt{8,95 \cdot 133,5 \cdot 4} + \sqrt{4,62 \cdot 132,9}} = 207 \text{ в};$$

$$\Delta U_2 = 189 \text{ в}; \quad \Delta U_3 = 204 \text{ в}.$$

С помощью формулы (5) определяем сечения проводов

$$s = 70,5 \text{ мм}^2; \quad s_2 = 43,7 \text{ мм}^2; \quad s_3 = 31,2 \text{ мм}^2$$

Принимаем ближайшие стандартные сечения проволочных стальных проводов $s_1 = 70$; $s_2 = 50$; $s_3 = 35$. Действительная общая потеря напряжения в линии составит 586 в.

Определим сечения проводов для случая, когда ток 1 выполняется алюминиевыми проводами.

1. Находим индуктивную составляющую потерь напряжения на первом участке и вычитаем ее из допускаемой потери напряжения:

$$\Delta U_{r1} = 15,6 \text{ в}; \quad \Delta U'_{o1} = 584,4 \text{ в}.$$

2. По формулам (9) находим распределение действительной потери напряжения по участкам линии (принимая алюминия $\rho = 31,2 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$)

$$\Delta U_{a1} = 105 \text{ в}; \quad \Delta U_2 = 230 \text{ в}; \quad \Delta U_3 = 249 \text{ в}.$$

3. Определяем сечения проводов

$$s_1 = 25,6 \text{ мм}^2; \quad s_2 = 36 \text{ мм}^2; \quad s_3 = 29 \text{ мм}^2.$$

Принимаем ближайшие стандартные сечения: $s_1 = 25 \text{ мм}^2$; $s_2 = 35 \text{ мм}^2$; $s_3 = 25 \text{ мм}^2$. Действительная потеря напряжения составит 593 в.



Коэффициент мощности несимметричной нагрузки трехфазной сети

Кандидат техн. наук Л. С. ЛУРЬЕ

ВИЭСХ

Несимметричная нагрузка трехфазной сети вызывается рядом причин, как то: 1) наличием однофазных токоприемников (сварочные установки, однофазные электропечи); 2) неодинаковым распределением нагрузки между отдельными фазами (осветительные и бытовые токоприемники); 3) работой в сети на некоторых ступенях трансформации по несимметричным схемам (работа двумя фазами, пофазный ремонт, неодинаковые коэффициенты трансформации у трансформаторов в отдельных фазах, смешанные системы питания и др.); 4) неравенством активных и реактивных сопротивлений, отдельных фаз некоторых приемников (трехфазные электропечи); 5) асимметрией напряжения, обуславливающей появление токов обратной последовательности и др.

Рассмотрены существующие определения коэффициента мощности. Предложено определять коэффициент мощности произвольной нагрузки трехфазной сети k_T , как отношение активной мощности к кажущейся мощности трехфазной системы [Л. 9]. Показана целесообразность представления k_T в виде произведения коэффициентов несимметрии сдвига.

При оценке влияния несимметричной нагрузки на трехфазную сеть в анализе показаний трехфазных фазометров, фазометров реактивной мощности и в некоторых других случаях необходимо определять коэффициент мощности цепей с несимметричными токами и напряжениями.

В литературе нет единой точки зрения по этому вопросу. Так, А. Д. Нестеренко [Л. 1] исследуя работу трехфазных фазометров, приводит выражения:

$$k_{ap} = \frac{P_a}{U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c}$$

и

$$k_s = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + P_r^2}},$$

матрица (1) в качестве истинного значения коэффициента мощности при любой несимметрии, справедливым только для нагрузки, близкой к равномерной. В выражениях (1) и (2): P_a , P_r — активная и реактивная мощности приемника, равные алгебраическим суммам соответствующих мощностей трех фаз; U — напряжение и токи в фазах прием-

Д. Каминский и С. П. Лебедев [Л. 2] для характеристики работы асинхронных двигателей при несимметрии подведенного напряжения определяют коэффициент мощности отношением (1). В. Брандт [Л. 3], оценивая влияние несимметрии на коэффициент мощности, в отличие от В. Нестеренко используют определение (2). В ряде статей [Л. 4, 5, 6], специально посвященных определению кажущейся мощности коэффициента мощности трехфазной системы, к (1) и (2) приводятся другие выражения (приложение I). Однако рекомендации в отношении возможности использования отдельных значений недостаточно обоснованы и точны. Содержанием настоящей статьи является рассмотрение об определении коэффициента мощности трехфазной сети при ее несимметричной нагрузке возможности использования этого определения. Рассмотрение ограничивается синусоидальными и симметрично выполненными трехфазными линиями. Некоторым различием значений сопротивлений отдельных фаз линии протекании в них неодинаковых токов мы пренебрегаем.

Коэффициент мощности симметричной трехфазной системы численно равен косинусу угла между током и напряжением ($\cos \varphi$) и в этом случае понятием „коэффициент мощности“ пользуются по ряду нижеследующих определений:

Коэффициент мощности должен быть определен по расчету при определении тока, если заданы активная мощность и напряжение ($I = \frac{P_a}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$),

или при определении кажущейся мощности по известной активной мощности ($P = \frac{P_a}{\cos \varphi}$).

От коэффициента мощности непосредственно зависят размеры или загрузка электроустановки, а также потери электрической энергии.

Коэффициент мощности должен быть учтен при определении себестоимости и тарификации электрической энергии.

Коэффициент мощности необходимо принимать во внимание при расчете потери напряжения в линии по заданному току $\Delta U = \sqrt{3} \times (r \cos \varphi + x \sin \varphi)$, где r , x — активное и реактивное сопротивление линии.

От коэффициента мощности зависит регулирование возбуждения синхронного генератора. С помощью коэффициента мощности определяют реактивную мощность по заданной активной мощности ($P_r = P_a \tan \varphi$).

7. Коэффициент мощности характеризует степень использования генераторов и сети.

8. Коэффициент мощности может быть определен непосредственно по показанию фазометра или по показаниям ваттметров активной и реактивной мощностей ($k = \cos \varphi = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + P_r^2}}$).

При неравномерной нагрузке во всех фазах протекают разные токи по величине. В этом случае выбор размеров или определение загрузки линии и группы однофазных трансформаторов должны производиться по максимальному току. Загрузка трехфазных трансформаторов зависит как от максимального тока, так и от суммарных потерь в трансформаторе [Л. 7]. Для генераторов, кроме того, должна быть проверена допустимость несимметричного режима в связи с тем, что возникают токи обратной последовательности, которые вызывают дополнительный нагрев ротора и вибрацию машины [Л. 8]. При несимметричной нагрузке в каждой фазе имеют место различные друг от друга потери активной мощности и напряжения, зависящие от величины тока и угла сдвига между напряжением и током или от активных и реактивных мощностей соответствующей фазы. Все это затрудняет определение коэффициента мощности несимметричной трехфазной нагрузки как характеристики всей системы в целом и ограничивает область использования рассматриваемой величины.

В статье автора [Л. 9] было показано, что кажущуюся мощность произвольной трехфазной системы целесообразно определить как наибольшую возможную активную мощность, которая может быть передана при заданных напряжениях и потерях в линии. Основываясь на таком определении, кажущуюся мощность следует выразить формулой

$$P_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2} \times \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_n^2 \gamma^2}.$$

Она может быть представлена также в виде корня квадратного из суммы квадратов активной мощности P_a , реактивной P_r и мощности несимметрии P_n (приложение II):

$$P_T = \sqrt{P_a^2 + P_r^2 + P_n^2}.$$

На основании этого за коэффициент мощности примем отношение

$$k_T = \frac{P_a}{P_T} = \frac{\sqrt{3} P_a}{\sqrt{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2} \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_n^2 \gamma^2}} = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + P_r^2 + P_n^2}}. \quad (3)$$

В приведенных выражениях: U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} — линейные напряжения; I_A , I_B , I_C — линейные токи; I_n — ток в нулевом проводе; $\gamma^2 = \frac{r_n}{r}$ есть отно-

шение активного сопротивления нулевого провода r_n к активному сопротивлению линейного провода r .

Потери активной мощности в линии симметричной системы обратно пропорциональны квадрату коэффициента мощности ($\cos \varphi$)

$$\Delta P_a = \frac{P_a^2}{U^2 \cos^2 \varphi} r. \quad (4)$$

В той же зависимости, но уже от величины k_T (3), находятся потери в трехфазной линии при неравномерной нагрузке. Действительно, согласно (3)

$$\begin{aligned} \Delta P_a &= (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_n^2) r = \\ &= \frac{P_a^2}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2) k_T^2} 3r. \end{aligned} \quad (4a)$$

Разделим числитель и знаменатель выражения (3) на $\sqrt{P_a^2 + P_r^2}$, тогда

$$k_T = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + P_r^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + k_{nep}}} = k_s k_n, \quad (3a)$$

где $k_{nep} = \frac{P_r^2}{P_a^2 + P_r^2}$ представляет коэффициент неравномерности нагрузки трехфазной сети; k_{nep} показывает, во сколько раз увеличиваются потери в сети по сравнению с потерями, которые имели бы место при передаче тех же активных и реактивных мощностей, но симметрично распределенной нагрузке между фазами [Л. 10].

Величина k_s , равная отношению активной мощности к векторной мощности $P_s = \sqrt{P_a^2 + P_r^2}$ и показывающая, во сколько раз снижается коэффициент мощности k_T вследствие сдвига по фазе между токами и напряжениями, может быть названа применительно к трехфазным системам с несимметричными токами и напряжениями коэффициентом сдвига. Величину k_n , показывающую, во сколько раз снижается k_T вследствие несимметрии приемника, целесообразно именовать коэффициентом несимметрии.

Таким образом, коэффициент мощности трехфазной нагрузки k_T в общем случае может быть представлен в виде произведения коэффициента сдвига на коэффициент несимметрии. Согласно (4a) значение величины k_T может быть использовано для определения потерь так же, как используется в случае равномерной нагрузки $\cos \varphi$. Следует, однако, иметь в виду, что k_T не обладает рядом других перечисленных выше свойств коэффициента мощности симметричной системы. Так, с помощью k_T нельзя определить потерю напряжения в сети, которая при неравномерной нагрузке для каждой фазы имеет свое значение. Знания k_T недостаточно для суждения об использовании генераторов, сети и т. д.

Если неравномерную нагрузку заменить валентной по потерям в сети симметричной грузкой, то угол сдвига между напряжением и токами в фазах симметричного прибудет равен коэффициенту мощности рассматриваемой неравномерной нагрузки.

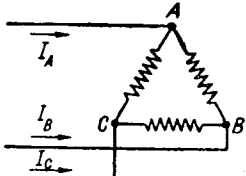
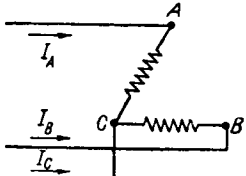
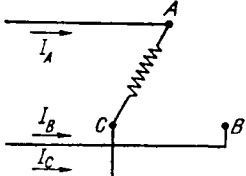
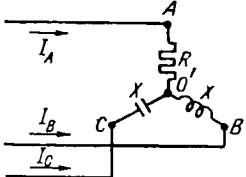
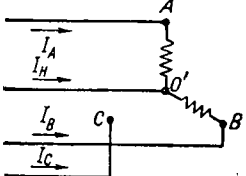
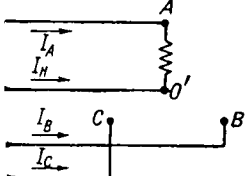
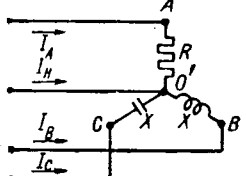
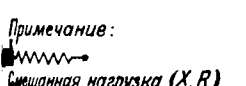
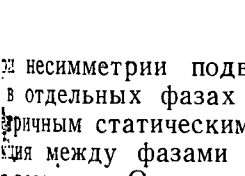
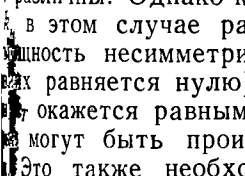

В приводимой таблице даны значения коэффициента несимметрии k_n и соответствующие значения коэффициента мощности k_T при деленной величине коэффициента сдвига ряда несимметричных нагрузок в трех- и четырехпроводных цепях. Для страсти того, какие значения может принимать и как при этом снижается коэффициент мощности k_T , рассмотрены нагрузки от равномерной (схема 1) до крайне неравномерной (схема 4). Как следует из (3a), при чисто активной (нагревательные приборы, осветительная нагрузка), когда $P_r = 0$, коэффициент сдвига и коэффициент мощности k_T оказываются равными коэффициенту несимметрии k_n . Если мощность несимметрии приемника $P_n = 0$, то $k_n = 1$ становится равным k_s .

Несимметричное включение приемников в фазную сеть значительно снижает их коэффициент мощности. Так, если нагрузка включена в открытый треугольник (схема 2), то $k_n = 0,5$, а коэффициент мощности $k_T = 0,716$ (при $k_s = 1$). В случае однофазной нагрузки (схема 3) коэффициент несимметрии снижается до 0,707, а коэффициент мощности k_T до 0,707. В том же случае $k_s = 0,8$ (однофазные двигатели, сварочные машины для контактного нагрева) коэффициент мощности k_T составляет всего 0,565. В наличии четырехпроводной цепи потери, следовательно, коэффициент мощности k_T зависят также и от соотношения между сопротивлениями нулевого и основного проводов ($\gamma^2 = \frac{r_n}{r}$). Так, при $\frac{r_n}{r} = 3,50$ (кабель 3X + 1X10) для однофазной нагрузки (схема 3) k_n падает до 0,272, а k_T до 0,218 (при $k_s = 1$).

Возможность представления коэффициента мощности двумя множителями (3a) позволяет решить вопрос о том, как могут быть использованы показания трехфазных фазометров или фазометров активной и реактивной мощностей, если напряжения и токи несимметричны. Эти показатели определяют отношение (2) [Л. 1], а следовательно, коэффициент сдвига в выражении (3) и могут быть в любом случае применены для определения полной реактивной мощности приемника по известной активной мощности P_a . Кроме того, эти показания могут определить потери в сети, обусловленные передачей активной и реактивной мощностей приемнику.

¹ Коэффициент сдвига k_s можно рассматривать как тангенс угла сдвига между токами и напряжениями симметричной системы, активные и реактивные мощности которой соответственно равны P_a и P_r данной несимметричной системы, поэтому $P_r = P_a \operatorname{tg} \varphi_{акв}$, где $\operatorname{tg} \varphi_{акв} = \frac{P_r}{P_a}$.

$$k_s = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + P_r^2}}.$$

Характер нагрузки трехфазной сети		$\frac{r_H}{r}$	$\frac{X}{R}$	k_θ	k_H	k_T	k_{ap}
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_B = I_C = I$	—	0	1	1	1	1
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_B = \frac{I_C}{\sqrt{3}} = I$	—	0,748	0,8	1	0,8	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,895	0,895	1
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0,748	0,8	0,895	0,716	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,707	1
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0,748	0,8	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8
	$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$ $I_A = I_C = I$ $I_B = 0$	—	0	1	0,707	0,565	0,8

Примечание:


 Смешанная нагрузка (X, R)

н несимметрии подведенного напряжения в отдельных фазах линии, обусловленные взаимным статическим приемником, взаимодействия между фазами которого равна нулю, различны. Однако коэффициент несимметрии в этом случае равняется единице (так как мощность несимметрии P_H при указанных условиях равняется нулю) и коэффициент мощности окажется равным k_θ , хотя напряжения могут быть произвольно несимметричны. Это также необходимо иметь в виду,

используя соответствующие измерения или расчеты. В общем случае для вычисления коэффициента мощности k_T необходимо в полученный на основании измерений или расчета коэффициент k_θ внести поправку, равную коэффициенту несимметрии k_H . Таким образом, влияние несимметрии приемника на трехфазную сеть может быть учтено только добавочным множителем k_H . Из сказанного нетрудно понять ошибочность использования выражения (2) для определения влияния

несимметрии на коэффициент мощности, как это делал Лемб и Брандт [Л. 3].

Коэффициент мощности, определяемый по формуле (1), в общем случае меньше коэффициента сдвига k_s . Действительно, знаменатель выражения (1) представляет арифметическую сумму кажущихся мощностей трех фаз, тогда как $\sqrt{P_a^2 + P_r^2}$ есть геометрическая сумма тех же величин. Однако, как показывают подсчитанные значения k_{ap} для всех нагрузок, приведенных в таблице, влияние несимметрии на уменьшение коэффициента мощности с помощью (1) учитывается только частично и то не во всех случаях. Так, для схем 2, 3, 5 и 6 коэффициент несимметрии k_n меняется в широких пределах от 0,895 до 0,272 и соответственно коэффициент мощности k_T от 0,895 до 0,218, тогда как k_{ap} остается равным коэффициенту сдвига k_s , колеблясь от 1 до 0,8.

Для однофазных нагрузок (схемы 3 и 6) равенство между k_{ap} и k_s имеет место всегда. Для нагрузок, включенных в две или три фазы $k_{ap} = k_s$ в том случае, если нагрузка в каждой фазе имеет одну и ту же величину отношения реактивного сопротивления X к активному R (схемы 1, 2, 5). Если $\frac{X}{R}$ для отдельных фаз различны (схемы 4 и 7), k_{ap} становится меньше k_s , но не снижается до величины k_T .

Следовательно, выражение (1) недостаточно полно характеризует влияние несимметричной нагрузки на потери активной мощности в трехфазной сети. Для других целей формула (1) не может быть использована так же, как и величина k_T (3).

Выводы. 1. Коэффициент мощности произвольной трехфазной нагрузки, определяемый выражением (3), непосредственно связан с потерями активной мощности в сети.

2. Выражение (3) целесообразно рассматривать в виде произведения коэффициента несимметрии на коэффициент сдвига. Первый учитывает влияние несимметрии нагрузки на коэффициент мощности, второй — влияние сдвига по фазе между токами и напряжениями в отдельных фазах.

3. Отношение (2) при несимметрии токов и напряжениях представляет коэффициент сдвига.

4. Другие существующие определения коэффициента мощности, в том числе (1), хотя в общем случае и меньше коэффициента сдвига, однако учитывают лишь частично увеличение потерь активной мощности, которые (потери) обуславливаются несимметрией нагрузки.

Приложение I. Коэффициент мощности определяется как отношение активной мощности к кажущейся мощности. В выражении (1) кажущаяся мощность определена как сумма кажущихся мощностей трех фаз приемника:

$$P_{ap} = U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c. \quad (1.1)$$

В выражении (2) — как корень квадратный из суммы квадратов активной и реактивной мощностей:

$$P_\theta = \sqrt{P_a^2 + P_r^2}. \quad (1.2)$$

В выражении (3) — как максимальная активная мощность, которая может быть передана приемнику при заданных напряжениях и потерях в сети [Л. 9]:

$$P_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2} \times \\ \times \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_n^2}.$$

Кроме (1.1), (1.2), (1.3) необходимо рассмотреть следующие определения кажущейся мощности и соответствующие им значения коэффициента мощности:

$$[Л. 4, 5, 6] \quad P_n = \sqrt{3} U_m I_m,$$

$$k_n = \frac{P_a}{P_n},$$

где U_m, I_m — наибольшие (эффективные) значения токов и напряжений;

$$[Л. 4, 6] \quad P'_{ap} = U_{AO} I_A + U_{BO} I_B + U_{CO} I_C,$$

$$k'_{ap} = \frac{P_a}{P'_{ap}},$$

где U_{AO}, U_{BO}, U_{CO} — напряжения линейных проводов относительно искусственной нейтрали точки O (фиг. 1) образованной звездой равных сопротивлений²;

$$[Л. 4, 6] \quad P_{a1} = U_{AO''} I_A + U_{BO''} I_B + U_{CO''} I_C + U_{OO''}$$

$$k_{a1} = \frac{P_a}{P_{a1}},$$

где $U_{AO''}, U_{BO''}, U_{CO''}$ — напряжения линейных проводов относительно нулевого провода относительно точки O'' , которая есть точка пересечения векторов I_A, I_B, I_C, I_n или их продолжений, причем эти векторы должны быть проведены из соответствующих вершин треугольника линейных напряжений (например, ток I_A из вершины A и т. д.) и из точки O' (рис. 2) и должны разовывать замкнутый четырехугольник. Точка O' — точка соединения концов трех фаз приемника (рис. 1). P_{a1} равна такой максимальной активной мощности, которая может быть получена при заданных линейных токах и напряжениях.

На рис. 2 показано, каким образом получить геометрически мощность P_{a1} . На этом рисунке O'' получается как точка пересечения всех (четырех) токов, так как ток I_n в этом случае может быть получен максимальной активной мощностью при заданных токах, поскольку все токи будут совпадать по фазе с напряжениями относительно точки O'' :

$$[Л. 5, 6] \quad P_T' = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2} \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_n^2}.$$

$$k_T' = \frac{P_a}{P_T'}$$

P_T' равна такой максимальной активной мощности, которая может быть получена при заданной сумме квадратов линейных токов и заданной сумме квадратов фазных напряжений.

М. Е. Сыркин [Л. 11] предложил называть кажущуюся мощность данной многофазной цепи суммой кажущихся мощностей фаз устройства, питающего эту цепь, т. е. дал определение, которое в зависимости от выбора точки относительно которой определяются фазные напряжения приводится к выражениям (1.1), (1.5) или им подобным.

Относительно кажущейся мощности P_n (1.4) можно сказать, что она определяет при заданном напряжении наибольший ток в линии и тем самым выражение (1.4)

² Точка O лежит в центре тяжести треугольника линейных напряжений.

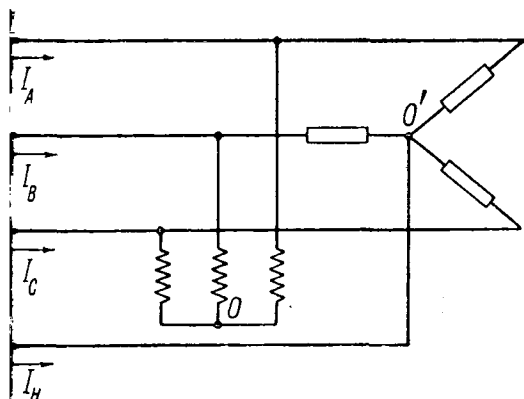


Рис. 1.

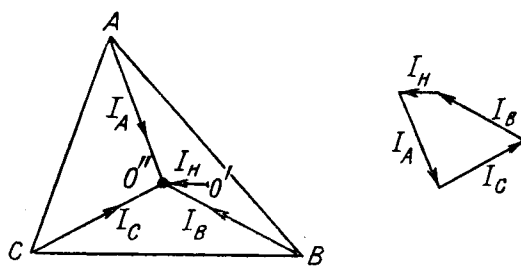


Рис. 2.

быть использовано для характеристики загрузки. Однако (1,4а) не связано непосредственно с потерей активной мощности в сети, как коэффициент мощности k_T (3), поскольку между ними существует неравенство $\frac{\sqrt{2}}{3} \leq \frac{k_n}{k_T} \leq 2$.

Сравним определения (1,5) и (1,6) с (1,2) и (1,3). Векторная мощность P_θ равна максимальной активной мощности, которая может быть получена при заданных линейных напряжениях и заданных углах сдвига между ними. Действительно, найдем максимум активной мощ-

$$= U_{AD} I_A \cos \varphi_A + U_{BD} I_B \cos \varphi_B + U_{CD} I_C \cos \varphi_C + U_{OD} I_N \cos \varphi_n$$

при заданных условиях. D — произвольная точка на топографической диаграмме, относительно которой взяты напряжения линейных проводов и нулевого провода; $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_n$ — углы сдвига между этими напряжениями и соответствующими линейными токами.

Если все токи повернуть на один и тот же угол ϕ , активная мощность станет равной:

$$P_{a\phi} = P_a \cos \phi - P_r \sin \phi,$$

$$P_r = U_{AD} I_A \sin \varphi_A + U_{BD} I_B \sin \varphi_B + U_{CD} I_C \sin \varphi_C + U_{OD} I_N \sin \varphi_n.$$

Максимум активной мощности будет иметь место, когда

$$\frac{dP_{a\phi}}{d\phi} = 0,$$

$$\operatorname{tg} \phi_n = -\frac{P_r}{P_a}; \quad \sin \phi_n = \pm \frac{P_r}{\sqrt{P_a^2 + P_r^2}};$$

$$\cos \phi_n = \mp \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + P_r^2}}.$$

Подставляя значения $\sin \phi_n$ и $\cos \phi_n$ в выражение $P_{a\phi}$, получим, что

$$P_{a\phi_n} = \sqrt{P_a^2 + P_r^2} = P_\theta.$$

Из сформулированных определений P_θ (1,2), $P_{a\phi}$ (1,6) и следует, что больше всего ограничений накладывают на векторную мощность P_θ (1,2), которая получается при определении максимума активной мощности, сохраняются неизменными величины токов, напря-

жений и углы сдвига между токами, а меньше всего ограничений накладывает на величину P_T , для получения которой может меняться не только фаза токов, как у $P_{a\phi}$ (1,6), но и величина их, поэтому

$$P_\theta \leq P_{a\phi} \leq P_T \quad (1,8)$$

или

$$k_\theta \geq k_{a\phi} \geq k_T. \quad (1,8a)$$

Сопоставляя определения P_θ , P'_{ap} и P_T , заметим следующее: кажущаяся мощность P'_{ap} (1,5) представляет арифметическую сумму трех составляющих, каждая из которых, например, $U_{AO} I_A$ может быть представлена в виде корня

$\sqrt{P_{aAO}^2 + P_{rAO}^2}$. В то же время P_θ (1,2) равна геометрической сумме этих величин. Выражение (1,5) одновременно можно рассматривать как скалярное произведение вектора с координатами U_{AO}, U_{BO}, U_{CO} на вектор с координатами I_A, I_B, I_C , тогда как $P_T = \sqrt{U_{AO}^2 + U_{BO}^2 + U_{CO}^2} \times$

$\times \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2}$ даже при $I_N = 0$, представляет произведение модулей этих векторов. На основании сказанного следует, что

$$P_\theta \leq P'_{ap} \leq P_T \quad (1,9)$$

или

$$k_\theta \geq k'_{ap} \geq k_T. \quad (1,9a)$$

Неравенства (1,8a) и (1,9a) показывают, что в общем случае $k_{a\phi}$ (1,6a) и k'_{ap} (1,5a) по величине меньше коэффициента сдвига (2) и больше коэффициента мощности k_T . $k_{a\phi}$ и k'_{ap} не могут полностью учесть снижение коэффициента мощности вследствие несимметрии приемника. $k_{a\phi}$ и k'_{ap} нельзя использовать в отличие от k_T в качестве величин, непосредственно связанных с потерей активной мощности в сети, а также нельзя использовать и для других целей.

Выражение (1,7a) для трехфазных трехпроводных цепей ближе других определений стоит к величине k_T (3). Однако при наличии нулевого провода k'_T (1,7a) не зави-

сит от $\gamma^2 = \frac{r_n}{r}$, т. е. не учитывает уменьшение коэффициента мощности, а следовательно, увеличение потерь в питающей системе вследствие того, что сечение нулевого провода меньше сечения основных проводов.

Приложение II. В приложении к статье [Л. 9] автором были приведены уравнения (15), (15a) и выведены формулы (18) и (18a) для мощности несимметрии P_n без учета влияния смещения действительной нейтрали приемника O' относительно центра тяжести треугольника линейных напряжений точки O . Однако, учитывая наличие этого смещения, следует уравнения (15) и (15a) [Л. 9] записать следующим образом:

$$P_a^2 + P_r^2 = (P_{aAO} + P_{aBO} + P_{aCO} + P_{aO'O})^2 + (P_{rAO} + P_{rBO} + P_{rCO} + P_{rO'O})^2$$

и

$$P_a^2 + P_r^2 = (3U_1 I_1 \cos \varphi_1 + 3U_2 I_2 \cos \varphi_2 + 3U_0 I_0 \cos \varphi_0)^2 + \\ + (3U_1 I_1 \sin \varphi_1 + 3U_2 I_2 \sin \varphi_2 + 3U_0 I_0 \sin \varphi_0)^2,$$

где

$$P_{aAO} = U_{AO} I_A \cos \varphi_A, \quad P_{rAO} = U_{AO} I_A \sin \varphi_A \text{ и т. д.};$$

$$P_{aO'O} = U_{O'O} I_N \cos \varphi_N, \quad P_r = U_{O'O} I_N \sin \varphi_N;$$

$U_{O'O}$ — напряжение действительной нейтрали приемника O' относительно точки O ;

φ_N — угол сдвига между напряжением $U_{O'O}$ и током в нейтральном проводе I_N ;

U_0 — напряжение нулевой последовательности системы фазных напряжений приемника.

Остальные обозначения, как и в приложении к статье [Л. 9].

Соответственно формулы (18) и (18а) мощности несимметрии P_N представляются в таком виде:

$$P_N^2 = \sum_{\substack{m,n=A_1 B_1 C_1 N \\ m \neq n}} [U_{mO}^2 I_n^2 + U_{nO}^2 I_m^2 - 2U_{mO} I_n U_{nO} I_m \times \\ \times \cos(\varphi_m - \varphi_n)] + \sum_{m=A_1 B_1 C} U_{mO}^2 I_n^2 (\gamma^2 - 1) - U_{O'O}^2 I_n^2$$

или

$$P_N^2 = 9 [U_1^2 I_2^2 + U_2^2 I_1^2 - U_0^2 I_0^2 - \\ - \sum_{\substack{m,n=1,2,0 \\ m \neq n}} 2U_m I_n U_n I_m \cos(\varphi_m - \varphi_n) + \\ + (U_1^2 + U_2^2) I_0^2 (1 + 3\gamma^2)].$$

Данные уточнения, естественно, имеют значение только для четырех проводных трехфазных цепей, когда $I_0 \neq 0$. Мощность несимметрии нетрудно выразить через коэффициенты несимметрии отдельных последовательностей $\epsilon_U = \frac{U_2}{U_1}$, $\epsilon_I = \frac{I_2}{I_1}$, $\epsilon_{0U} = \frac{U_0}{U_1}$, $\epsilon_{0I} = \frac{I_0}{I_1}$. Действительно, вынося в последнем уравнении $U_1^2 I_1^2$ за скобки, получим:

$$P_N^2 = 9U_1^2 I_1^2 \left\{ \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 + \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 - \left(\frac{U_0}{U_1} \right)^2 \left(\frac{I_0}{I_1} \right)^2 - \right. \\ \left. - \sum_{\substack{m,n=1,2,0 \\ m \neq n}} 2 \left(\frac{U_m}{U_1} \right) \left(\frac{I_n}{I_1} \right) \left(\frac{U_n}{U_1} \right) \left(\frac{I_m}{I_1} \right) \cos(\varphi_m - \varphi_n) + \right. \\ \left. + \left[1 + \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \right] \left(\frac{I_0}{I_1} \right)^2 (1 + 3\gamma^2) \right\}.$$

Для характерных частных случаев выражения мощности несимметрии упрощается. Так, в случае симметричного подведенного напряжения $U_2 = 0$ (линейное напряжение U) и

$$P_N^2 = 3U^2 I_1^2 \left[\left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 - \left(\frac{U_0}{U_1} \right)^2 \left(\frac{I_0}{I_1} \right)^2 - 2 \left(\frac{U_0}{U_1} \right) \left(\frac{I_0}{I_1} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_0) + \left(\frac{I_0}{I_1} \right)^2 (1 + 3\gamma^2) \right].$$

Для трехпроводных цепей $I_0 = 0$ и

$$P_N^2 = 9U_1^2 I_1^2 \left[\left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 + \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 - 2 \left(\frac{U_2}{U_1} \right) \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right],$$

при симметрии линейных напряжений

$$P_N^2 = 9U_1^2 I_1^2 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 = 3U^2 I_2^2.$$

Литература

1. А. Д. Нестеренко. Трехфазные фазовые. Электричество, № 6, 1948.
2. М. Д. Каминский и С. П. Лебедев. Характеристика асинхронных двигателей при асимметрии напряжения. Электричество, № 15-16, 1936.
3. J. F. Lamb and Brandt. Vektor Power Factor in 3-Phase Circuits. El. Eng., № 11, 1949; the Vektor Power Factor of Unbalanced Sinusoidal 3-Phase Circuits. AIEE, т. 68, стр. 507, 1949.
4. H. Curtis and Silsbee. Definitions of Power and Related Quantities. El. Eng., стр. 334, 1935.
5. ETZ, стр. 297, 1937 (из AEF).
6. G. Howe. Defining Power Factor. El. Rev., № 1, 1941.
7. А. А. Иногамов. Располагаемая мощность трехфазных трансформаторов по нагреву при несимметричных режимах. Труды Института энергетики Академии наук УзССР, вып. 5, стр. 124-136, 1951.
8. И. А. Сыромятников и Г. Н. Тер-Гарян. Определение допустимой нагрузки гидрогенераторов в несимметричном режиме. Госэнергоиздат, стр. 1951.
9. Л. С. Лурье. Кажущаяся мощность трехфазной системы. Электричество, № 1, 1951.
10. Л. С. Лурье. Определение увеличения активной мощности в трехфазной сети при неравномерной нагрузке. Энергетический бюллетень, № 8, 1951.
11. М. Е. Сыркин. Некоторые вопросы теории баланса в многофазных цепях. Труды Института энергетики Академии наук УзССР, вып. 3, стр. 8-76, 1949.

[27. 9. 51]



наибольшей величине к. п. д. четырехполюсника

Инж. Г. А. ЧАЯНОВ

Москва

В статье „О зависимости коэффициентов отдачи мощности двух произвольно выбранных точек электрической цепи“ (Электричество, № 12, 1949) была выяснена зависимость между коэффициентами отдачи мощности двух произвольно выбранных точек передачи электроэнергии и коэффициентами полезного действия (для противоположных направлений передачи) участка линии, ограниченного взятыми точками.

Рассмотрим одно из возможных применений теоремы для получения общего выражения наибольшего к. п. д. несимметричного четырехполюсника в виде несложной формулы

$$\eta_{\text{макс}} = \left| \frac{Z_1 + Z_1'^*}{Z_1 + Z_1'} \right| \cdot \left| \frac{Z_2 + Z_2'^*}{Z_2 + Z_2'} \right| \cdot e^{-2b}, \quad (1)$$

Z_1, Z_2 — характеристические сопротивления четырехполюсника;

Z_1', Z_2' — его сопряженно-характеристические сопротивления;

b — волновая постоянная затухания.

Формула (1) выводится непосредственно из теоремы для коэффициентов отдачи мощности образованных из рассматриваемого четырехполюсника при нагрузке одного конца его на характеристические, а другого на сопряженно-характеристические сопротивления (рис. 1 и 2). Вписав выражения для наибольших к. п. д. в схем в виде:

Применительно к теореме, предложенной в статье автора (Электричество, № 12, 1949), рассматриваются выражения для расчетов наибольшего к. п. д. и наименьшей величины действующего затухания пассивного несимметричного четырехполюсника.

и приняв во внимание, что в написанных уравнениях величина наибольшего к. п. д. одна и та же

$$\eta_{12 \text{ макс}} = \eta_{21 \text{ макс}},$$

можно без труда получить из них уравнение (1).

Следует заметить, что уравнение (1) может быть применено также для расчета наименьшей величины действующего затухания четырехпо-

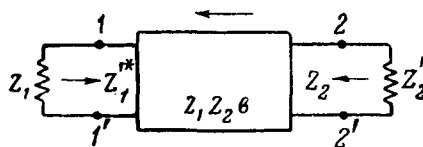


Рис. 1.

люсников. Из известного соотношения величин коэффициента отдачи мощности цепи и действующего затухания, определяемого равенством

$$b_N = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{N}, \quad (4)$$

видно, что действующее затухание цепи имеет наименьшую величину при наибольшем значении коэффициента отдачи мощности. Последнее, как

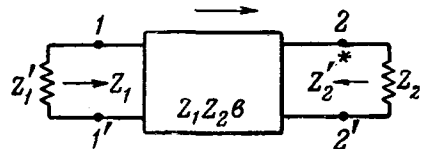


Рис. 2.

это было показано в упоминавшейся выше работе автора, равно наибольшему к. п. д. четырехполюсника. Таким образом, для наименьшей величины действующего затухания пассивного, несимметричного четырехполюсника получаем формулу

$$b_{N \text{ мин}} = b - \ln \left| \frac{Z_1 + Z_1'}{Z_1 + Z_1'^*} \right| - \ln \left| \frac{Z_2 + Z_2'}{Z_2 + Z_2'^*} \right|.$$

[4.5.1951]



Борьба с помехами от генераторов высокой частоты для промышленных целей

Доктор техн. наук, проф. Б. П. ТЕРЕНТЬЕВ

Московский электромеханический институт связи

Города и рабочие поселки Советского Союза насыщены радиоприемниками, телевизорами и т. д. Радиовещание в СССР продолжает развиваться быстрыми темпами. В то же время широкое внедрение в промышленную технологию токов высокой частоты приводит к тому, что в индустриальных городах высококачественный радиоприем делается почти невозможным из-за высокого уровня помех.

Установки токов высокой частоты (ТВЧ) для производственных целей, обладая большой мощностью, создают, как будет указано ниже, весьма сильные помехи радиоприему в широком диапазоне частот. Поэтому вопрос о мерах борьбы с этими помехами является вполне своевременным и весьма актуальным. Для урегулирования вопросов, связанных с промышленными помехами, в Министерстве связи организована радиоинспекция, назначение которой — готовить мероприятия по уменьшению помех радиоприему и контролировать выполнение утвержденных мероприятий.

Для установок ТВЧ, работающих в диапазоне частот 0,15...0,5 мГц, установлены следующие допустимые величины помех¹. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 100 м от установки не более 250 мкВ/м и напряжение высокочастотной помехи в проводах питания на расстоянии 50 м от установки не более 1 000 мкВ.

Радиоинспекции дано право запрещать производство установок ТВЧ и их эксплуатацию в случае, если не будут приняты меры к уменьшению помех до величины, обусловленной нормами. По этой причине нами была проведена работа по измерению величины помех, создаваемых установками ГЗ-46 и ГС-48 прежних выпусков, и по разработке мероприятий для уменьшения этих помех. Измерение помех, создаваемых генератором ГЗ-46 без экранировки на расстоянии 100 м, дало величину порядка 5 000 мкВ/м, что превосходит допустимую величину 250 мкВ/м больше чем в 20 раз.

Напряжения помехи на проводах питания генератора составили следующие величины: 1) на

Рассматривается актуальный вопрос о мерах борьбы с помехами радиовещанию и радиоприему, возникающими от поля, создаваемого генераторами высокой частоты, а также с помехами, прсникающими через сеть питания. Рекомендуются защитные устройства для ликвидации или значительного ослабления помех в месте их возникновения.

проводах силового в генераторе 25 2) на зажимах мального автомата расстоянии 10 м) 30 в; 3) на сборных нах подстанции (на

стоянии 65 м) свыше 100 000 мкВ.

Как видно из приведенных цифр, помех незащищенного генератора значительно превышают допустимые величины.

Проследим возникновение помех и, в частности, выясним каналы, по которым они распространяются. Основным элементом, создающим электромагнитное поле помех, в установках являются провода, по которым протекает ток высокой частоты, в частности, контура. Сильное магнитное поле вокруг катушки создает, ввиду большой частоты, значительное электромагнитное поле помех на больших расстояниях. Вторым источником помех являются провода и элементы генератора, находящиеся под высоким потенциалом высокой частоты, — анодные дроссели, лампы и т. д. Электрическое поле, создаваемое этими элементами, также вызывает появление электромагнитных волн.

Для ослабления электромагнитного поля помех применяются металлические экраны. Рассмотрим условия, которым должны удовлетворять такие экраны.

На рис. 1 изображена картина распределения электрического поля от проводника А. Направление на этом проводнике относительно земли

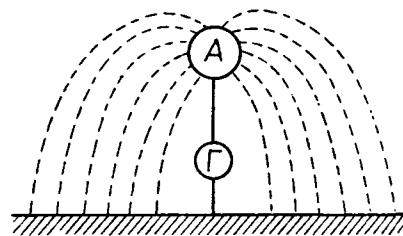


Рис. 1.

дается генератором высокой частоты (Г). Для ослабления внешнего поля вокруг проводника он помещается в металлический экран. В этом случае силовые линии поля будут замыкаться

¹ Подробное изложение норм на радиопомехи опубликовано, например, в книге С. А. Лютова, Индустриальные помехи радиоприему и борьба с ними, ГЭИ, 1951.

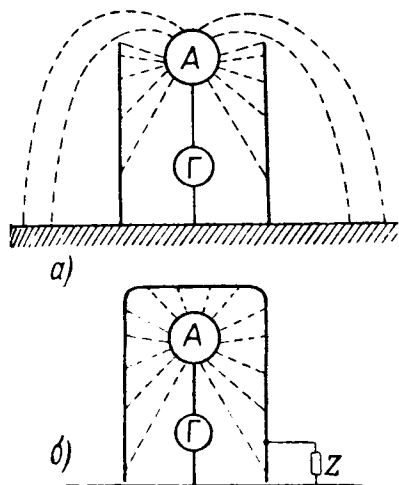


Рис. 2.

и внешнего поля уже не будет. Для полной защиты необходимо, чтобы экран окружал провод со всех сторон, так как, если например, цилиндрический экран не будет замкнут сверху, часть силовых линий может выйти за пределы экрана (рис. 2,а).

С точки зрения электростатики для уничтожения внешнего поля необходимо, чтобы потенциал экрана был равен нулю. В частности, если экран соединен с землей будет узкая щель, а экран соединяется с землей через какое-либо сопротивление, то при статическом поле никакого внешнего поля не будет (рис. 2,б). При высокой частоте введение этого сопротивления нарушает экранировку. В этом случае ток, протекающий по емкости проводника А относительно экрана,

$$I_c = U\omega C,$$

U — напряжение провода А;

ω — частота тока;

C — емкость проводника А относительно экрана.

Этот ток будет протекать по сопротивлению Z и создаст на нем падение напряжения, равное:

$$U_z = I_c Z.$$

Если Z — индуктивное сопротивление заземляющего провода, то падение напряжения на нем следовательно, и напряжение на экране будут равны:

$$U_{\text{экр}} \approx I_c \omega L \approx U\omega^2 LC.$$

Таким образом, сам экран стал источником помех.

Как видно из приведенной формулы, напряжение на экране относительно земли, а следовательно и величина поля помех пропорциональны квадрату частоты ω и индуктивности заземляющего провода. Поэтому очень важно, чтобы провод заземления имели малую индуктивность, что необходимо выполнять их из широкой медной ленты возможно меньшей

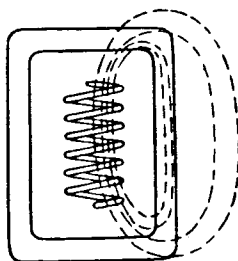


Рис. 3.

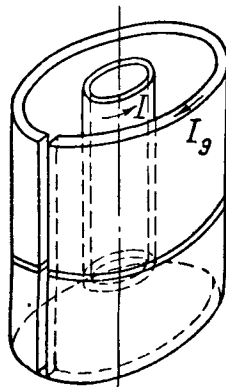


Рис. 4.

Магнитное поле катушки при постоянном токе и токе низкой частоты ослабляется экранами из материалов, имеющих большую магнитную проницаемость (μ). В этом случае (рис. 3) магнитные силовые линии, выходящие из катушки, замыкаются главным образом по экрану, так как его сопротивление для силовых линий много меньше (в μ раз), чем у воздуха. Однако часть силовых линий выходит за пределы экрана и осуществить полную экранировку на низкой частоте очень трудно. На высоких же частотах картина будет совершенно иная.

Если окружить катушку цилиндрическим экраном из проводника, то под действием переменного магнитного поля в экране возникает э. д. с. Под действием этой э. д. с. в экране возникают токи. Магнитное поле изменяется в фазе с током катушки. Электродвижущая сила, наведенная магнитным потоком в экране, отстает от поля на 90° . Если проводник экрана имеет хорошую проводимость (медь), то его сопротивление для наведенных токов будет почти чисто индуктивным. В этом случае ток в экране будет отставать от э. д. с. на 90° и, следовательно, по фазе он будет противоположен току в катушке (рис. 4). Магнитное поле этих токов будет также противоположно магнитному полю катушки и суммарное поле за экраном будет равно нулю. Если экран сделать из проводника с меньшей проводимостью, то наведенные токи будут меньше и будут отставать уже не на 90° от э. д. с. Следовательно, в этом случае экранировка будет хуже.

Таким образом, для хорошей экранировки на высокой частоте необходимо изготавливать экраны из хорошего проводника. Большая магнитная проницаемость материала экрана здесь уже не имеет значения, так как глубина проникновения магнитного поля в магнитный материал из-за наведенных токов будет всего порядка нескольких микрон.

На высоких частотах к конструкции экрана предъявляются совершенно иные требования, чем на низких. На низких частотах, например, продольная щель, делящая экран из ферромагнитного материала на несколько частей по образующим цилиндра (рис. 4), никакого значения не имеет, так как она не разрывает магнитных

линий. Щель же по окружности (рис. 4) прерывает магнитные линии и ухудшает экранировку. На высоких же частотах продольные щели прерывают линии наведенных токов и переменный магнитный поток катушки не будет скомпенсирован токами экрана. Щели же по окружности не будут разрывать токов, и тем самым экранировка не нарушится.

Таким образом, к высокочастотному экрану должны быть предъявлены следующие основные требования:

1. Экран должен быть сделан из материала с хорошей проводимостью (медь, латунь, алюминий). Необходимая толщина экрана зависит от частоты тока и должна в несколько раз превышать глубину проникновения тока в материал экрана. Например, для генераторов ГЗ-46 и ГС-48, работающих на частотах порядка 250—300 кГц, толщина экрана может быть взята 0,3 ... 0,4 мм.

2. Экран должен быть сконструирован так, чтобы для наведенных токов был создан путь с наименьшим сопротивлением. В частности, должны быть обеспечены хорошие контакты в местах, где в экране должны быть отверстия (двери). В противном случае наряду с плохой экранировкой будет иметь место и сильный разогрев плохих контактов.

Для определения ориентировочного направления наведенных токов нужно изобразить проекцию проводников, несущих ток высокой частоты на экран. Токи, наведенные в экране, будут иметь примерно ту же форму, но с обратным знаком, и контуры токов будут расплывчатыми.

Экран можно изготовлять и не из сплошного листа. Вполне удовлетворительные результаты экранировки были получены и при применении медной сетки. В этом случае необходимо учитывать направление наведенных токов и располагать сетку так, чтобы направление проволок сетки совпадало с направлением токов. При этом избегаются потери в переходных контактах между проводами сетки.

Экранирование генераторов ГЗ-46 и ГС-48 можно производить либо экранированием помещения, в котором расположены генератор и сушильная камера, либо экранированием только самих генераторов и сушильных камер. В первом случае производится либо обивка стен помещения металлическими листами, либо установка специального экрана из сетки.

В качестве материала для обивки стен можно применять цветной металл — латунь, алюми-

ний или даже железо. Необходимо толщ ответствии со сказанным выше обеспечить надежные контакты между всеми листами, применяя сварку или пайку. Экранирование необходимо не только стены, но и потолок, пол и окна. Экран на двери при закрывании иметь хороший контакт с экраном на стене. Такой экранировке неизбежно приходится придавать степень вентиляции помещения.

Экранировка генераторов может быть нута также путем установки вокруг генератора специального экрана из медной сетки. В этом случае отпадает осложнение с вентиляцией, уменьшается расход материала.

Как та, так и другая экранировка дают не удовлетворительные результаты. Генератор ГС-48, помещенный в экран из медной сетки при включенном фильтре в проводе питания полной нагрузке на эквивалент, создавая поле помех на расстоянии 100 м не более 15 ... 20 мкВ/м, т. е. значительно ниже допустимой величины.

При нормальной нагрузке генератора рабочий конденсатор (сушильная камера), экранированный латунной сеткой, получался уровнем помех ниже допустимых величин в 5 раз (меньше 60 мкВ/м). Напряженность допустимая нормами, получалась на расстоянии всего 15 ... 25 м от рабочего конденсатора.

Необходимость экранировки рабочего конденсатора подтверждена опытом. Необходимо отметить, что при этом опыте, несмотря на наличие фильтра в проводах питания, на шинах станции напряжение помех высокой частоты росло во много раз. Объясняется это тем, что высокая частота наводилась с рабочего конденсатора на провода освещения камеры и отсюда поступала на сборные шины, и защитный фильтр.

При работе генератора ГЗ-46, экранированного медной сеткой, уровень помех был значительно ниже норм. Для экранировки возможно использование металлического каркаса генератора. В генераторе ГЗ-46 металлический каркас (остов) не является сплошным, а имеет разрыв спереди, где помещается фанерная панель. Против этого же места имеется разрыв и в чугунной раме, на которой монтируется генератор. Дело в том, что это же для того, чтобы наведенные в каркасе токи не разогревали плохих контактов в двух и других местах соединения отдельных частей каркаса. Как видно из приведенных уже выше изображений, такой каркас не является экраном.

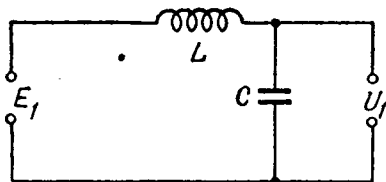


Рис. 5.

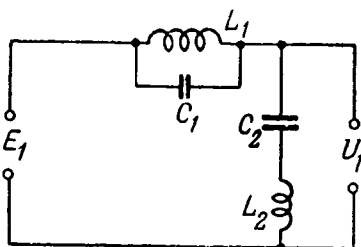


Рис. 6.

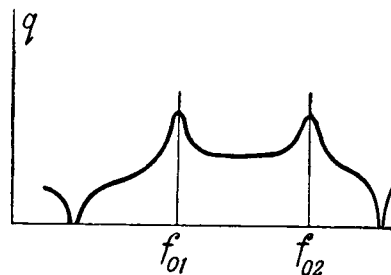


Рис. 7.

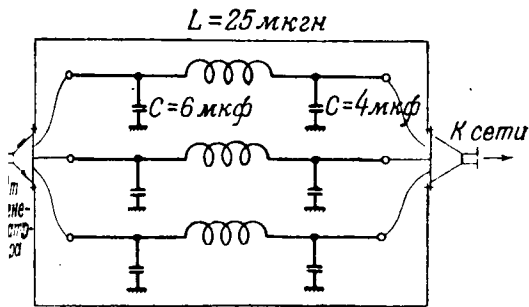


Рис. 8.

значительно, генератор ГЗ-46 в своем обычном исполнении, без экранировки, создает уровень помех порядка 5 000 мкВ вместо допуска 250 мкВ/м.

Для придания каркасу качеств экрана было изготовлено следующее: 1) деревянная панель зашита алюминиевым листом; 2) сделаны хорошие контакты между дверями и каркасом; пол и потолок закрыты металлическими листами; 4) смотровые окна закрыты медной фольгой.

При этих условиях уровень поля помех снижен до величины 70...100 мкВ/м, т. е. стал в 3 раза меньше допустимого нормами.

Мы рассмотрели способы борьбы с радиопомехами, возникающими от поля, создаваемого непосредственно самим генератором. Другая возможность помехи радиоприему возникает за счет высокой частоты, проникающих через сеть здания. В приемник эти помехи могут попасть непосредственно через выпрямитель питания приемника. Кроме того, сама сеть — ее воздушные провода и цепи освещения — является своеобразной антенной, способной излучать высокую энергию. Эта излученная энергия попадает уже в вход приемника и создает помехи, как работающая радиостанция.

Поэтому необходимо, чтобы от генератора напряжение высокой частоты на сборных шинах относительно земли не превосходило определенных значений (для частот 0,15...0,5 мГц не более 1 000 мкВ).

Как как напряжение высокой частоты на шинах питания в самом генераторе составляет величину порядка 20...35 В, то необходимо их ослабить в 30...50 000 раз. Для этого употреблены специальные фильтры, состоящие из катушек индуктивности и конденсаторов. На рис. 8 изображена принципиальная схема такого фильтра, состоящего из катушки индуктивности L и конденсатора C .

Под действием э. д. с. помехи E_1 через эти катушки пойдет ток, который создаст на выходе фильтра напряжение U_1 :

$$|U_1| = \frac{E_1}{x_L - x_C} \cdot x_C.$$

Ослабление помех (коэффициент фильтрации) фильтра равен:

$$K = \frac{E_1}{U_1} = \left| \frac{x_L - x_C}{x_C} \right| = \frac{x_L}{x_C} - 1 = \omega^2 LC - 1.$$

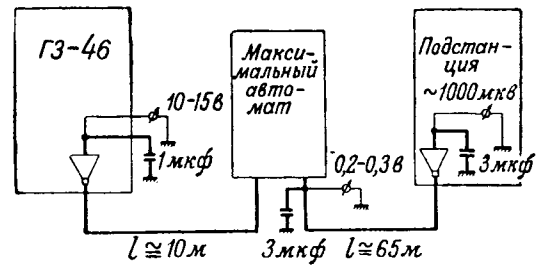


Рис. 9.

Однако так как приходится иметь дело с высокими частотами, то в расчет приходится принимать не только емкость конденсатора, но и индуктивность выводов и соединительных проводов конденсатора и не только индуктивность дросселя, но и его собственную емкость. Поэтому полная схема фильтра для высоких частот выглядит так, как изображено на рис. 6. В этом случае зависимость коэффициента фильтрации от частоты более сложная. На рис. 7 изображена кривая коэффициента фильтрации такого фильтра. В этом случае высокое значение q лежит в пределах частот от f_{01} до f_{02} , где f_{01} — собственная частота контура, состоящего из индуктивности L и ее собственной емкости C_1 а f_{02} — собственная частота контура, состоящая из емкости конденсатора C_2 и его индуктивности L_2 . Для расширения рабочего участка необходимо повышать f_{02} , т. е. уменьшать индуктивность конденсаторов и проводов, соединяющих конденсаторы с корпусом. Обычные так называемые «телефонные» конденсаторы емкостью 0,1—4 мкФ обладают довольно значительной собственной индуктивностью и потому мало пригодны для фильтров на высокие частоты. Для этой цели выпускаются специальные конденсаторы, имеющие очень малую индуктивность (типа ВЗК).

Так как э. д. с. высокочастотной помехи создается генератором между проводами и корпусом генератора, то приходится ставить фильтр во все провода сети и конденсаторы присоединять к корпусу генератора или к оболочке кабеля, которая должна иметь хороший контакт с корпусом генератора.

Если коэффициент фильтрации одного фильтра недостаточен для ослабления помех, то ставятся два или несколько звеньев, состоящих каждое из индуктивностей и емкостей. В этом случае общий коэффициент фильтрации будет равен произведению коэффициентов фильтрации отдельных звеньев.

Заводом, выпускающим генераторы ТВЧ, разработан и серийно выпускается фильтр к генераторам ГЗ-46 и ГС-48, схема которого изображена на рис. 8. Фильтр имеет одно звено; дроссели без стального сердечника, так как обычная трансформаторная сталь на частотах 250...300 кГц почти не увеличивает индуктивности дросселя из-за наличия поверхностного эффекта.

Весьма важным условием при установке фильтра является, как это следует из приведенных выше соображений, хороший контакт (с малым индуктивным сопротивлением) между обо-

лочками кабелей (подводящем и отводящем) и корпусом фильтра, так как при большом переходном сопротивлении на нем будет происходить падение напряжения от емкостных токов высокой частоты и на корпусе фильтра появится напряжение; это напряжение проникнет через конденсатор фильтра в питающую сеть и ухудшит условия фильтрации.

Установкой фильтров можно уменьшить напряжение помех в сети до весьма малых величин. Фильтры при правильном пользовании ими снижают напряжение помех на сборных шинах

подстанции (50 м от генератора) до величин порядка 200 ... 300 мкв. Значительное ослабление напряжения помех можно получить, исключив индуктивность кабеля и катушек автомата в цепи индуктивности фильтра. Так, установка фильтровых конденсаторов на проводах питания в самом генераторе после автомата и на сборных шинах даже без применения фильтра позволяет снизить напряжения высокочастотной помехи на сборных шинах до величины порядка 1 000 мкв (рис. 9).



Из опыта работы

Расчет люминесцентного освещения общественных и административных помещений

Кандидат техн. наук, доц. М. М. ЕПАНЕШНИКОВ

Московский энергетический институт им. М. Г. Энгельса

Внедрение в практику осветительной техники люминесцентных ламп для освещения административно-конторских, учебных и других помещений высотных зданий ставит вопрос о методике расчета таких установок. Существующие методы расчета осветительных установок с люминесцентными лампами [Л. 1, 2, 3] решают поставленную задачу неполно, позволяя определить лишь прямую составляющую освещенности, что совершенно недостаточно в случаях использования светильников, посылающих заметную долю светового потока в верхнюю полусферу, в особенности в помещениях со светлой отделкой стен и потолка, роль многократных отражений светового потока в которых достаточно велика. Учет отраженной составляющей освещенности возможен с большей или меньшей степенью точности путем расчета многократных отражений между поверхностями, ограничивающими освещаемый объем. Для этого требуется предварительный расчет распределения прямого светового потока в освещаемом объеме, что достаточно трудоемко и малопривлекательно для проектной практики [Л. 4, 5].

Учитывая эти соображения, а также имея в виду необходимость расчета такого рода осветительных установок для большого количества разнородных по характеру и размерам помещений, естественно было поставить вопрос о разработке метода расчета, который позволял бы проектировщику решить эту задачу с наименьшей затратой времени и с достаточной для практики точностью.

Приводится методика расчета осветительных установок, выполненных светильниками с люминесцентными лампами, снабженными диффузными отражателями, рассеивателями или защитными экранами. Приведены таблицы, позволяющие рассчитать такую установку при наличии данных о к. п. д. светильника и о соотношении световых потоков в верхнюю и нижнюю полусферы окружающего пространства.

Предлагаемый метод расчета базируется на предположении о равномерном светораспределении от светильников с горизонтально расположенными люминесцентными лампами, снабженными диффузными

отражателями, рассеивающими свет в обе стороны или защитными экранами, подчиняется закону косинуса.

Допущение позволяет создать весьма простую методику расчета, которая не нуждается в знании характеристик светораспределения светильника, а требует лишь знать его к. п. д. и распределение светового потока между верхней и нижней полусферами окружающего пространства. Предлагаемый метод, как будет показано ниже, учитывает влияние отраженного светового потока и обеспечивает вполне достаточную точность.

Сущность расчета заключается в следующем. Полагая, в общем случае, наличие трех поверхностей (потолок, стены, пол), обладающих определенными отражающими свойствами, и выражение для средней освещенности расчетной плоскости представить в виде:

$$E_p = \frac{F_p' U_p^p + F_n' U_p^n + F_{cm}' U_p^{cm}}{S_p \cdot k},$$

где F_p' , F_n' , F_{cm}' — соответственно световые потоки, непосредственно падающие от светильников на расчетную плоскость, потолок и стены;

U_p^n, U_p^a, U_p^{cm} — соответственно коэффициенты использования световых потоков, первоначально падающих от светильников на расчетную плоскость, потолок и стены, относительно расчетной плоскости;

S_p — площадь расчетной плоскости;

k — коэффициент запаса.

Из приведенного уравнения видно, что расчет ценности с учетом многократных отражений распадается на две стадии: расчет распределения световых потоков, непосредственно падающих от светильников на расчетную плоскость, потолок и стены (F_p', F_n', F_{cm}'), и определение коэффициентов использования этих потоков относительно расчетной плоскости (U_p^n, U_p^{cm}).

Рассмотрим каждую из стадий самостоятельно.

При расчете распределения световых потоков, непосредственно падающих от светильников на расчетную плоскость, мы располагаем рядом методов, позволяющих с большей или меньшей степенью точности решить эту задачу [Л. 6, 7]. Они справедливы лишь для круглосимметричных светильников. В том случае, когда светильник не обладает круговой симметрией, распределения световых потоков не могут быть выполнены ни одним из этих методов, что существенно, в значительной мере усложняет расчет. Учитывая это и имея в виду, что люминесцентная лампа представляет собой линейный элемент, фотометрическое тело — торонд, естественно было задуматься о том, насколько велика асимметрия светораспределения в реальных светильниках с люминесцентными лампами и нельзя ли с допустимой степенью приближения считать светильники, рассматриваемые в рассматриваемых нами случаях, симметричными.

С этой целью нами было проанализировано светораспределение различных конструкций светильников, используемых для общественных зданий и учебных заведений.

На рис. 1 приведен ряд кривых силы света, перпендикулярной оси светильника, с разными отражателем 1, рассеивателем из матового стекла 2 и светильника с защитными экранами 3. Все эти кривые по своему характеру являются косинусной кривой 4. Основное различие заключается лишь в соотношениях потока, падающего на расчетную плоскость в верхнюю и нижнюю части окружающего пространства.

Известно, что в плоскости оси светильника с люминесцентными лампами кривая силы света является, по существу, косинусной кривой, мы можем к предварительному выводу о возможности считать светильники, используемые в рассматриваемых нами случаях, т. е. светильники, ориентированно расположенными лампами, снаб-

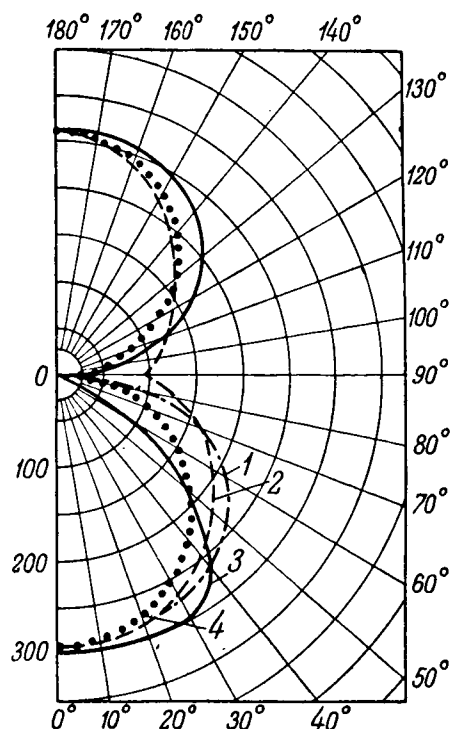


Рис. 1. Кривые силы света светильников с люминесцентными лампами.

женные диффузными отражателями, рассеивающими стеклами или защитными экранами, — за светильники, обладающие круговой симметрией.

Полученный нами предварительный вывод требует дальнейшей оценки возникающей при этом погрешности, но, тем не менее, имеет существенный интерес, так как позволяет построить весьма простую методику расчета такого рода осветительных установок.

Действительно, принимая, что светораспределение светильника подчиняется закону косинуса и отличается для их различных типов лишь соотношением световых потоков в нижнюю и верхнюю полусферы, мы имеем возможность заранее рассчитать это распределение на заданную плоскость для различных помещений.

На основании таких расчетов составлены графики, приведенные на рис. 2, где показаны зависимости отношений светового потока, падающего на расчетную плоскость и потолок, к световому потоку светильника в функции показателя помещения.

Расчет световых потоков, падающих непосредственно на расчетную плоскость, потолок и стены, пользуясь приведенными графиками, осуществляется по соотношениям

$$\left. \begin{aligned} F_p' &= n U_p' F_{\Sigma}, \\ F_n' &= n U_n' F_{\Sigma}, \\ F_{cm}' &= n F_{\Sigma} - (F_p' + F_n'), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Значение коэффициентов использования U_p^p, U_p^n, U_p^{cm} для различных значений коэффициентов отражения потолка, стен и расчетной плоскости

ρ_n	0,7			0,5			0,5			0,5			0,3			0,1		
ρ_{cm}	0,5			0,5			0,5			0,5			0,3			0,1		
ρ_p	0,3			0,1			0,3			0,1			0,3			0,1		
φ	U_p^p	U_p^n	U_p^{cm}	U_p^p	U_p^n	U_p^{cm}	U_p^p	U_p^n	U_p^{cm}	U_p^p	U_p^n	U_p^{cm}	U_p^p	U_p^n	U_p^{cm}	U_p^p	U_p^n	U_p^{cm}
0,3	1,06	0,07	0,13	1,02	0,08	0,12	1,06	0,06	0,12	1,02	0,05	0,12	1,03	0,03	0,06	1,01	0,03	0,09
0,4	1,06	0,14	0,16	1,02	0,14	0,15	1,06	0,10	0,15	1,02	0,09	0,14	1,03	0,07	0,07	1,01	0,06	0,10
0,5	1,07	0,20	0,19	1,02	0,19	0,18	1,06	0,15	0,18	1,02	0,12	0,17	1,03	0,10	0,09	1,01	0,10	0,13
0,6	1,07	0,25	0,22	1,02	0,24	0,21	1,07	0,19	0,20	1,02	0,17	0,19	1,04	0,13	0,10	1,01	0,13	0,16
0,7	1,08	0,30	0,24	1,03	0,29	0,23	1,07	0,21	0,22	1,02	0,20	0,21	1,04	0,16	0,11	1,01	0,16	0,19
0,8	1,09	0,34	0,26	1,03	0,32	0,25	1,07	0,23	0,24	1,02	0,22	0,23	1,04	0,19	0,12	1,01	0,18	0,21
0,9	1,10	0,35	0,27	1,03	0,35	0,26	1,08	0,26	0,25	1,03	0,25	0,23	1,05	0,21	0,13	1,02	0,21	0,23
1,0	1,10	0,41	0,29	1,03	0,39	0,27	1,08	0,28	0,26	1,03	0,28	0,25	1,05	0,23	0,14	1,02	0,23	0,25
1,25	1,12	0,47	0,33	1,04	0,44	0,30	1,09	0,32	0,29	1,03	0,31	0,27	1,06	0,28	0,15	1,02	0,27	0,29
1,50	1,13	0,53	0,36	1,04	0,48	0,31	1,10	0,36	0,31	1,03	0,33	0,29	1,07	0,31	0,17	1,02	0,3	0,31
1,75	1,14	0,56	0,37	1,04	0,52	0,33	1,11	0,38	0,32	1,03	0,36	0,30	1,08	0,34	0,18	1,03	0,33	0,33
2,00	1,15	0,60	0,38	1,05	0,55	0,34	1,11	0,40	0,33	1,04	0,37	0,31	1,09	0,36	0,19	1,03	0,35	0,35
3,00	1,18	0,68	0,43	1,06	0,62	0,35	1,13	0,46	0,37	1,04	0,41	0,34	1,11	0,42	0,20	1,03	0,40	0,40
4,00	1,20	0,73	0,46	1,06	0,65	0,38	1,14	0,49	0,38	1,04	0,45	0,35	1,12	0,46	0,22	1,04	0,43	0,43
5,00	1,21	0,75	0,47	1,06	0,66	0,41	1,14	0,50	0,39	1,04	0,46	0,36	1,13	0,48	0,23	1,04	0,45	0,45

Сравнительные значения коэффициента использования осветительной установки U_{cs} для различных светильников ($\rho_n = 70\%$; $\rho_{cm} = 50\%$; $\rho_p = 0,1$)

φ	Светильник с диффузным отражателем $F_{\square} = 0$; $F_{\square} = 79\%$		Многоламповый светильник с рассеивателем из пластмассы $F_{\square} = 16\%$; $F_{\square} = 46\%$		Полуцилиндр из рассеивающего стекла $F_{\square} = 23\%$; $F_{\square} = 43\%$		Двухламповый светильник с экранами $F_{\square} = 22\%$; $F_{\square} = 50\%$		Многоламповый светильник со стеклами экранами $F_{\square} = 17\%$; $F_{\square} = 47\%$	
	Расчетное	По каталогу	Расчетное	По каталогу	Расчетное	По каталогу	Расчетное	По каталогу	Расчетное	По каталогу
0,6	0,364	0,37	0,236	0,27	0,228	0,22	0,257	0,28	0,332	0,35
0,8	0,445	0,46	0,236	0,33	0,287	0,27	0,323	0,34	0,415	0,44
1,0	0,500	0,50	0,332	0,36	0,328	0,30	0,367	0,37	0,461	0,48
1,5	0,585	0,58	0,396	0,41	0,394	0,36	0,44	0,44	0,548	0,57
2,0	0,640	0,62	0,44	0,44	0,442	0,40	0,493	0,47	0,635	0,67
3,0	0,695	0,69	0,486	0,48	0,492	0,45	0,546	0,51	0,67	0,72
5,0	0,750	0,74	0,525	0,51	0,532	0,50	0,59	0,57	0,72	0,78

где F_{\square}, F_{\square} — соответственно фактический световой поток светильника в нижнюю и верхнюю полусферы;

F_{cs} — фактический световой поток светильника;

n — число светильников в помещении.

Для расчета коэффициентов использования световых потоков, падающих от светильников на поверхности, окружающие освещаемый объем, использованы таблицы соотношений светностей расчетной плоскости с учетом многократных отражений (R_p) и светностей этих поверхностей, создаваемых лишь первоначально падающими световыми потоками (R_p', R_n', R_{cm}') [Л. 8].

Наличие этих соотношений для различных показателей помещений φ и различных коэффициентов отражения ρ позволило рассчитать значения интересующих нас коэффициентов использования для практически возможных комбинаций (табл. 1).

Наличие графиков $U_p' = f(\varphi)$ и $U_n' = f(\varphi)$, а также таблиц коэффициентов использования

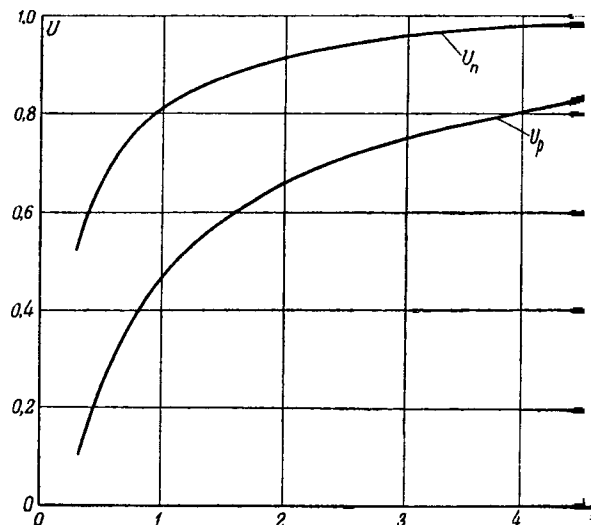


Рис. 2. Зависимость коэффициентов использования прямого потока U от показателя помещения φ .

U_p^p, U_p^n, U_p^{cm} позволяет, в свою очередь, рассчитать значения коэффициентов использования

святильников с различным соотношением светового потока в верхнюю и нижнюю полусферы.

Рассчитанные значения для разных φ и $\psi = \frac{F_{\text{в}}}{F_{\text{св}}}$

представлены в виде таблиц I—IV, приведенных в приложении к настоящей статье.¹

Пользуясь таблицами, среднюю освещенность расчетной плоскости можно рассчитать по формуле

$$E_p = \frac{n F_A U_{\text{св}} \eta}{S_p k}, \quad (3)$$

$U_{\text{св}}$ — значение коэффициента использования светильника, найденное из таблиц для заданных значений S_p , S_n , $S_{\text{св}}$, φ и ψ ;

η — к. п. д. светильника;

n — число ламп в помещении;

F_A — световой поток лампы.

S_p — площади расчетных плоскостей.

Для оценки точности предлагаемой методики, пользуясь приведенными таблицами, нами рассчитаны коэффициенты использования осветительных установок для пяти типов светильников люминесцентными лампами, приведенные в табл. 2. В этой же таблице для каждого типа светильника указано значение коэффициента использования по каталожным данным.

Как следует из сопоставления тех и других, отклонения в значениях коэффициентов использования не превышают 3 и 4%, что подтверждает правомочность принятого нами положения о синусном светораспределении рассматриваемых разновидностей светильников с люминесцентными лампами и применимости предлагаемой методики для проектной практики.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица I

Коэффициенты использования светильников для $\rho_n = 0,7$; $\rho_{\text{св}} = 0,5$; $\rho_p = 0,3$

φ	$\psi = 0$	$\psi = 0,2$	$\psi = 0,4$	$\psi = 0,6$	$\psi = 0,8$	$\psi = 1,0$
0,3	0,22	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10
0,4	0,31	0,27	0,24	0,21	0,18	0,15
0,5	0,40	0,36	0,32	0,28	0,24	0,20
0,6	0,48	0,43	0,38	0,34	0,29	0,24
0,7	0,54	0,49	0,44	0,40	0,34	0,29
0,8	0,60	0,54	0,48	0,43	0,37	0,32
0,9	0,64	0,58	0,51	0,46	0,40	0,35
1,0	0,67	0,62	0,56	0,50	0,44	0,39
1,25	0,75	0,69	0,63	0,56	0,50	0,45
1,50	0,81	0,75	0,68	0,63	0,57	0,50
1,75	0,85	0,79	0,73	0,67	0,60	0,54
2,0	0,89	0,83	0,76	0,70	0,64	0,58
3,0	0,99	0,93	0,86	0,80	0,73	0,67
4,0	1,05	0,98	0,92	0,85	0,79	0,72
5,0	1,10	1,02	0,95	0,89	0,81	0,75

Таблицы рассчитаны Л. И. Молчановой

Литература

- А. И. Герасимович. Бюллетень ВЭИ, № 8, 1940.
- K. Frank. Ill. Eng., № 4, 1942.
- М. С. Рябов. Упрощенный способ расчета освещенности светильников с флуоресцентными лампами, в: ТЭХСО, 1947.

Таблица II

Коэффициенты использования светильников для $\rho_n = 0,7$; $\rho_{\text{св}} = 0,5$; $\rho_p = 0,1$

φ	$\psi = 0$	$\psi = 0,2$	$\psi = 0,4$	$\psi = 0,6$	$\psi = 0,8$	$\psi = 1,0$
0,3	0,21	0,19	0,17	0,14	0,12	0,10
0,4	0,29	0,26	0,23	0,20	0,17	0,15
0,5	0,38	0,34	0,30	0,26	0,22	0,19
0,6	0,46	0,41	0,37	0,32	0,27	0,23
0,7	0,52	0,47	0,42	0,37	0,32	0,27
0,8	0,57	0,51	0,46	0,40	0,35	0,30
0,9	0,60	0,55	0,50	0,44	0,39	0,33
1,0	0,63	0,58	0,52	0,47	0,42	0,36
1,25	0,69	0,63	0,58	0,53	0,47	0,42
1,50	0,73	0,68	0,63	0,57	0,51	0,46
1,75	0,78	0,72	0,67	0,61	0,56	0,50
2,0	0,81	0,75	0,70	0,65	0,59	0,53
3,0	0,88	0,83	0,77	0,72	0,66	0,60
4,0	0,93	0,87	0,81	0,75	0,70	0,64
5,0	0,95	0,90	0,84	0,77	0,71	0,65

Таблица III

Коэффициенты использования светильников для $\rho_n = 0,5$; $\rho_{\text{св}} = 0,5$; $\rho_p = 0,1$

φ	$\psi = 0$	$\psi = 0,2$	$\psi = 0,4$	$\psi = 0,6$	$\psi = 0,8$	$\psi = 1,0$
0,3	0,21	0,19	0,16	0,13	0,11	0,08
0,4	0,29	0,25	0,21	0,18	0,14	0,11
0,5	0,37	0,33	0,27	0,23	0,19	0,14
0,6	0,45	0,39	0,34	0,28	0,23	0,17
0,7	0,50	0,44	0,38	0,32	0,26	0,20
0,8	0,55	0,49	0,42	0,35	0,29	0,22
0,9	0,59	0,52	0,45	0,38	0,31	0,25
1,0	0,62	0,55	0,48	0,41	0,34	0,27
1,25	0,67	0,60	0,52	0,45	0,38	0,30
1,50	0,72	0,64	0,56	0,48	0,41	0,33
1,75	0,76	0,68	0,60	0,51	0,43	0,35
2,0	0,79	0,70	0,62	0,54	0,45	0,36
3,0	0,86	0,77	0,68	0,59	0,50	0,41
4,0	0,91	0,81	0,72	0,63	0,54	0,44
5,0	0,94	0,84	0,74	0,65	0,55	0,45

Таблица IV

Коэффициенты использования светильников для $\rho_n = 0,5$; $\rho_{\text{св}} = 0,3$; $\rho_p = 0,1$

φ	$\psi = 0$	$\psi = 0,2$	$\psi = 0,4$	$\psi = 0,6$	$\psi = 0,8$	$\psi = 1,0$
0,3	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,04
0,4	0,23	0,19	0,16	0,13	0,10	0,06
0,5	0,31	0,27	0,22	0,18	0,14	0,10
0,6	0,38	0,33	0,28	0,22	0,17	0,12
0,7	0,43	0,38	0,32	0,26	0,20	0,15
0,8	0,48	0,42	0,36	0,29	0,23	0,17
0,9	0,52	0,45	0,39	0,32	0,26	0,19
1,0	0,55	0,48	0,41	0,35	0,28	0,21
1,25	0,61	0,54	0,47	0,40	0,32	0,25
1,50	0,66	0,59	0,51	0,43	0,36	0,28
1,75	0,71	0,63	0,55	0,47	0,39	0,31
2,0	0,74	0,66	0,58	0,50	0,42	0,33
3,0	0,82	0,73	0,65	0,56	0,47	0,39
4,0	0,88	0,78	0,69	0,60	0,51	0,42
5,0	0,92	0,82	0,72	0,63	0,54	0,44

О практической единице меры тока в системе МКСА

Инженер-капитан А. Я. ЕГЕРМАН

г. Рига

До создания абсолютной практической системы единиц — МКСА (метр—килограмм—секунда — ампер) — основой для определения практических единиц в электротехнике считался кулон; единица измерения тока — ампер — была вторичной или производной единицей («кулон в секунду»).

В системе МКСА: единица длины — метр (государственный эталон, № 28), единица массы — килограмм (гос. эталон № 12), единица времени — солнечная секунда (0,000.011.605.762.8 средних звездных суток). Определение ампера в системе МКСА содержится в проекте, разработанном при участии Комитета по делам мер и измерительных приборов, в такой формулировке:

«Ампер неизменяющийся электрический ток, который, протекая по каждому из двух бесконечно длинных параллельных прямолинейных проводников ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии 2 метров друг от друга в безвоздушном пространстве, создает между этими проводниками, на каждый метр их длины, силу взаимодействия, которая массе в одну десятимиллионную килограмма сообщает ускорение в 1 метр за секунду в квадрате»¹.

Как известно, первичной единицей электрических измерений является кулон — количество электричества (или количество движущихся электрических зарядов), соответствующее отложению на катоде вольтметра, из водного раствора AgNO_3 примерно 1,118 мг серебра. Если это количество серебра отложилось за 1 сек, то считается, что ток в проводнике равен 1 а, а через поперечное сечение проводника прошло приблизительно $6,3 \cdot 10^{18}$ отдельных (элементарных) зарядов.

Таким образом, определение кулона сводится к точному взвешиванию вещества, отложившегося на катоде в процессе электролиза; точность этих измерений может быть строго проконтролирована. Определение же ампера, приведенное выше, не может служить основой для изготовления практической меры, аналогичной эталонам длины, массы и времени, и поэтому такое определение ампера нельзя ставить рядом с точными определениями эталонов метра, килограмма и секунды.

Определение единицы тока (ампера), основывающееся на определении силы взаимодействия двух проводников с током (притяжения или отталкивания), — взаимодействия, сила которого зависит от напряженности магнитного поля и действует вдоль прямой, соединяющей центры сечения обоих параллельных проводников, не соответствует условиям опыта по определению абсолютного ампера, так как прямые параллельные проводники практически не применяются. Следовательно, абстракций («бесконечно длинные», «ничтожно малого сечения», «в безвоздушном пространстве» содержащихся в приведенном выше определении ампера, не позволяет выполнить эталон ампера практически.

Прежде всего при полном соблюдении этих условий нельзя было бы получить неизменяющийся электрический ток, который заранее предполагается существующим (в «бесконечно длинных проводниках» «ничтожно малого сечения»).

Для «спасения» указанного уже отвлеченного определения ампера пришлось бы, вероятно, добавить еще «абсолютно равномерное распределение электромагнитных и гравитационных полей «вокруг» проводников в «бесконечном пространстве» и тому подобные оговорки, которые, однако, еще более усилили бы внутреннее противоречие и схоластическую форму определения. Материя (поля) распределена (практически) неравномерно; для бесконечно длинных проводников об «абсолютно равномерном распределении материи» вокруг них не может быть и речи.

«Бесконечно длинные проводники» «ничтожно малого круглого сечения» не существуют, равно как и невозможна проверка равномерности, их сечения вдоль «всего» проводника. Далее, практически невозможно выполнить «ничтожно малое круглое сечение». Сохранение параллельности бесконечно длинных проводников (с ничтожно малым сечением!) заставляет предполагать их невесомыми и не подверженными действию окружающих, неравномерно распределенных электромагнитных полей. Но в невесомом «проводнике» (какое же «ничтожно малое сечение он должен иметь для этого!) нет и электрического тока, а значит, в таком «устройстве» нет и «проводника». Что понимать под «ничтожно малым сечением», через которое движутся электрические заряды: сечение проводника, из-

¹ Нами подчеркнуты слова цитируемого определения, на которые следует обратить специальное внимание (А. Я.).

ное хотя бы точнейшими опытами, или сечение, диаметр которого выражается (теоретически, конечно) дифференциалом длины? Одно ясно: через такой проводник нельзя пропустить ток в 1 а.

Нам известны источники достаточно постоянного тока, постоянство которого может быть достаточно точно проверено, но совершенно неизвестны источники «неизменяющегося тока». Эталоны килограмма, метра и секунды вполне доступны чувственному восприятию и точному контролю с помощью современных приборов и современной теории. Эталоны метра, килограмма, секунды выполнены и используются таким образом, как меры длины, массы и времени. Хороша была бы «практическая единица меры тока», неосуществимая в виде эталона — практически.

Целесообразно ли в практической системе единиц определять единицу электрического тока на основе взаимодействия магнитных полей двух проводников с током? Повидимому, определение тока не должно закрывать путь для изготовления практического эталона ампера, столь конкретного, как эталоны мер длины, массы и времени. В ином случае вводить ампер, как равнозначную единицу измерения в абсолютную практическую систему мер (МКСА), нет оснований.

Итак, ампер, или кулон?..

Если же и ампер, и кулон, то как определить один из них? Имея в виду все, что сказано выше, мы приходим к выводу, что предложенное решение по делам мер и измерительных при-

боров определение ампера неудачно. Преподавателям электротехники известно, как трудно усваивается слушателями (даже с известной подготовкой) это теоретизированное определение.

Элементы определения ампера: характер тока, размеры и расположение проводников и окружающие условия — должны отражать собой возможность действительных измерений силы взаимодействия двух проводников с током, на основе эталонов метра, килограмма, секунды с достаточной для современных методов измерения точностью. Такое определение ампера, по нашему мнению, могло бы иметь следующую форму:

«Ампер — практическая единица меры электрического тока, соответствующая силе взаимодействия эталонных проводников с током, равной... кг $\frac{м}{сек}$, если ток остается постоянным не менее ... секунды, а размеры и расположение этих проводников ... (такие-то) ...».

Эталон должен быть защищен от внешних электрических и магнитных полей. Для увеличения точности в направлении взаимодействующих проводников с током можно учесть направление силовых линий земного поля тяготения.

Мы не предприняем и даже не пытаемся решить поднятый вопрос до конца. Одно ясно — отвлеченное определение ампера (допускаемое в теории) в системе единиц МКСА слабо связано с действительно практической мерой количества электричества — кулоном. Нужен ли независимый, отдельный от определения кулона эталон ампера, или нет? — это можно и нужно определить. По нашему мнению, — нужен.



Определение электрических единиц абсолютной практической системы

Доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

1. Разделение практических единиц на абсолютные и международные. Практические единицы электрических величин первоначально (в 1881 гг.) определялись как точные десятичные кратные или дольные соответствующих абсолютной магнитной системы см г сек (СГС-М).

Для определения всей системы практических единиц, по существу дела, было достаточно дать определение двух единиц, так как остальные могут быть найдены из установленных уравнений связи.

Так, например, из определений

1 практ. един. напряжения (в) = 10^8 ед. см. г сек.

1 практ. един. сопротивления (ом) = 10^9 ед. см. г сек.

при наличии принятого уравнения связи между током, напряжением и сопротивлением

$$i = u/r \quad (1)$$

следует, что «ток, производимый 1 вольт в 1 оме» равен практической единице тока (амперу). При этом практическая единица тока оказывается равной 0,1 единицы тока в магнитной системе см г сек. Аналогично могут быть определены и другие практические единицы электрических величин. Очевидно, что достаточно было бы и определений единицы энергии (джоуль) и единицы тока. В таком случае, например, единица напряжения (вольт) определяется как такое напряжение, при котором ток в 1 а производит работу в 1 дж за 1 сек.

При создании вещественных эталонов, служащих для определения всех электрических единиц, первоначально стремились к их возможно точному совпадению с указанными выше теоретическими определениями. По мере усовершенствования измерительной техники производилось многократное уточнение вещественных эталонов, так как определяемые по ним единицы несколько отличались от 10^8 , 10^9 , 10^{-1} и т. д. единиц системы *см г сек*. Расхождение между теоретическим значением единиц и значением единиц, определяемых по вещественным эталонам, было крайне незначительно, однако оно принципиально не позволяло основывать систему электрических измерений на вещественных образцах единиц. Поэтому на международной конференции в 1908 г. было принято следующее постановление [Л. 1].

I. Конференция постановляет, что основные электрические единицы в электрической системе мер должны определяться по электромагнитной системе, в которой за единицу длины взят сантиметр, за единицу массы — грамм и за единицу времени — секунда. Эти основные единицы суть:

1) ом — единица электрического сопротивления, равная 10^9 единиц CGS;

2) ампер — единица тока, равная 10^{-1} единицы CGS;

3) вольт — единица э. д. с., равная 10^8 единиц CGS;

4) ватт — единица мощности, равная 10^7 единиц CGS.

II. В качестве системы единиц, которая с достаточным приближением для электрических измерений и законодательных целей воспроизводит вышеназванные единицы, конференция рекомендует принятие международного ома, международного ампера, международного вольта и международного ватта.

III. Ом есть первая основная единица.

IV. Международный ом определяется как сопротивление некоторого определенного столба ртути.

V. Международный ом есть сопротивление, которым обладает столб ртути длиной 106,300 см и массой 14,421 г, постоянного поперечного сечения при прохождении неизменяющегося тока при температуре тающего льда. Для получения сопротивления ртутного столба, равного международному ому, необходимо пользоваться способом, указанным в прилагаемой спецификации.

VI. Ампер — вторая основная единица.

VII. Международный ампер — такой неизменяющийся ток, который, проходя через водный раствор азотнокислого серебра, при соблюдении приложенной спецификации выделяет 0,00111800 г серебра в 1 сек.

VIII. Международный вольт — такое напряжение, которое в проводнике с сопротивлением в один международный ом производит ток в один международный ампер.

IX. Международный ватт — мощность, которую расходует постоянный электрический ток в один международный ампер при напряжении в один международный вольт.

После решения конференции 1908 г. с всей отчетливостью различать единицы абстрактные практические (определенные в разделах II—IX приведенного выше постановления). Последние были введены соответствующими актами как законные единицы практической системы.

Слово «абсолютная» введено в наименование первой системы практических единиц для различия от второй системы практических единиц, в наименование которой введено слово «народная». Слово «абсолютная» подчеркивает связь между единицами этой системы и единицами магнитной системы *см г сек*, которую ранее было принято называть абсолютной магнитной системой *см г сек*. Слово абсолютный в данном случае имело вполне определенный смысл: измерение всех электрических (и магнитных) величин в этой системе производилось не в сравнении с тем или иным условным эталоном одноименной электрической величины, а производилось к измерению длины (*см*), массы и времени (*сек*). Такие измерения было бы называть абсолютными.

2. Преимущества абсолютной практической системы единиц. Из сопоставления результатов определения электрических единиц практической системы, произведенных в ряде национальных метрологических лабораторий за последние 15 лет выяснилось, что в настоящее время единица может быть определена по электродинамическому действию точнее, чем по серебряному вольтметру с его сложной (а может быть, и не вполне однозначной) спецификацией. Решающую роль при этом играла как техника эксперимента, так и техника проведения расчета. Напротив, когда о величине тока судили по силе взаимного притяжения двух кольцевых катушек, необходимо было с очень большой точностью соблюдать данные геометрические размеры, а при расчете сил надо было учесть влияние конечного расстояния взаимодействующих проводов, несколько различную плотность тока в наружных и внутренних частях сечения провода и т. п.

В итоге опыт показал, что наибольшую точность и воспроизводимость результатов можно получить именно при электродинамическом определении ампера. Это и послужило поводом к тому, что вновь было решено перейти к абсолютным практическим единицам, отказавшись от единиц международных.

Для подавляющего большинства как технических, так и физических измерений переход от одной системы единиц к другой имеет практического значения и остается неизменным, так как разница между единицами систем не превосходит нескольких сотых процента.

3. Согласованные и несогласованные системы практических единиц. Рассмотренные выше практические электрические единицы и общепринятые единицы не образовывали согласованной системы: в общепринятой системе уравнения должны содержать дополнительные множители.

ствование которых определяется только тем, единицы, выбранные для величин, входящих в уравнения, не были согласованы с принятой формой записи этих уравнений.

Простейшим примером несогласованности является система, в которой приняты в качестве единицы длины и объема *см*, *м*, *л* при наличии явления

$$V = h^3, \quad (2)$$

дающего объем куба с ребром *h*.

Вместо записи (2) при указанных единицах надо писать:

$$V = 10^{-3} h^3 \text{ или } V = 10^{-3} \frac{h^3}{\text{см}^3}. \quad (3)$$

Для согласованности единиц мер и уравнений требуется в данном случае в качестве единицы объема принять *см³*.

Согласованность единиц системы *см г сек* электрических электрических единиц очевидна, так как единицей энергии в группе электрических единиц является не эрг, а

$$1 \text{ дж} = 10^7 \text{ эрг}.$$

Кинетическая энергия тела с массой *M* при скорости *v* равна:

$$T = Mv^2/2,$$

Если выразить в *г*, а *v* в *см/сек*, *T* окажется выраженной в эргах. Масса входит в формулу кинетической энергии в первой степени, а скорость — во второй. Следовательно, если принять массы, длины и времени единицы 10^m г , 10^l см и 10^t сек , то кинетическая энергия окажется выраженной в единицах, превосходящих $10^m \cdot 10^{2l} \cdot 10^{-2t}$ раз.

Для того чтобы получить систему согласованных единиц, охватывающую электрические, механические и общезначимые величины, нужно, при новых единицах длины, массы и времени кинетическая энергия выражалась в джоулях. Необходимым условием для этого является следующее:

$$m + 2l - 2t = 7. \quad (4)$$

Принять единицу времени явно нецелесообразно, особенно принимая во внимание, что при принятии всех электрических единиц именно секунда принималась за единицу времени:

$$1 \text{ а сек} = 1 \text{ к},$$

$$1 \text{ в сек} = 1 \text{ вб} \text{ и т. п.}$$

Нельзя выбирать подходящие значения для *l*.

Существует практически очень удобное решение — принять в качестве единиц массы и длины 1 м . Очевидно, что в этом случае действительное

$$m + 2l = 3 + 4 = 7.$$

Единицей работы в этой системе *м кг сек* является $1 \text{ дж} = 10^7 \text{ эрг}$, а единицей силы $1 \text{ дж/м} = 1 \text{ ньютон} = 1 \frac{\text{кг м}}{\text{сек}^2} = 10^5 \text{ дин}$.

Но условие (4) является не единственным условием согласованности между единицами и уравнениями, если требовать, чтобы не изменялась запись и других уравнений, согласованных с абсолютной магнитной системой *см г сек*.

В самом деле, обратимся хотя бы к выражению для силы взаимодействия между проводниками с током, приходящейся на отрезок провода длиной *b*,

$$F = 2 \frac{i^2 b}{r}, \quad (5)$$

справедливому при хорошо известных ограничивающих условиях (см. ниже п. 4).

Это уравнение является согласованным с системой единиц *см г сек*. Более того, оно может рассматриваться как определение единицы тока в этой системе:

$$i \text{ (в единицах см г сек)} = \sqrt{\frac{Fr}{2b}} \quad (6)$$

(при *F*, *r* и *b* в единицах той же системы *см г сек*).

Для того чтобы уравнение (5) оказалось согласованным с системой единиц, в которой для энергии и тока имеются единицы 10^7 эрг и $10^{-1} \text{ ед. см г сек}$, необходимо выполнение следующего условия:

$$7 = -2 + l. \quad (7)$$

Действительно, произведение *Fr*, выражаясь в джоулях, имеет в 10^7 раз меньшее числовое значение, а при выражении тока в амперах и длины в 10^l см , правая часть имеет числовое значение, меньшее в $10^{-2} \cdot 10^l$, чем при выражении всех величин в единицах системы *см г сек*. Поэтому при выполнении условия (7) числовые значения левой и правой частей равенства совпадают.

Это дополнительное условие приводит к необходимости принять $l = 9$, т. е. принять в качестве единицы длины

$$[L] = 10^9 \text{ см}.$$

В качестве единицы массы в соответствии с требованием уравнения (4) получается:

$$[M] = 10^{-11} \text{ г}.$$

Соответственная единица силы

$$[F] = 10^{-2} \text{ дин}.$$

О такой системе единиц говорилось неоднократно (Максвелл § 629, 1873 г.), а в 1889 г. на Втором международном конгрессе электриков эта система была принята как абсолютная практическая система, поскольку в ней действительно электрическими единицами являются

ампер, вольт, ом, кулон, генри, фарада, вебер (вольтсекунда), джоуль и ватт.

Неудобство общезначимых и механических единиц такой абсолютной системы очевидно, к тому же в этой системе единицей магнитной индукции является $10^{-10} \text{ гс} = 1 \text{ в сек} / (10^9 \text{ см})^2$.

В силу сказанного эта система совершенно на практике не привилась, а распространение получили системы единиц несогласованных.

Так, силу взаимодействия между проводами с током [в условиях применимости уравнения (5)] часто стали вычислять по равенству

$$F = 1,02 \cdot 10^{-8} \frac{2i^2 b}{r}, \quad (8)$$

выражая в нем силу в кг , ток в а , линейные размеры в см . Множитель $1,02 \cdot 10^{-8}$ является следствием несогласованности. Для соблюдения принципа размерной однородности, требующейся при записи физических уравнений (их иногда называют „полными“ в отличие от уравнений, связывающих только числовые значения), уравнение (8) можно записать так:

$$F = 1,02 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{а}^2} \frac{2i^2 b}{r}. \quad (9)$$

Заметим, что такое полное уравнение остается справедливым независимо от выбора единиц для i , r , b .

Несогласованной с уравнением (5) является и система м кг сек . В уравнении (5) появляется множитель $10^{-7} \frac{\text{ньютон}}{\text{а}^2}$. Следовательно, вместо (5) следует писать:

$$F = 10^{-7} \frac{\text{ньютон}}{\text{а}^2} \frac{2i^2 b}{r}. \quad (10)$$

4. Условия применимости уравнения (5).

Как уже говорилось, эти условия, относящиеся к уравнениям (5), (8), (9) и (10), общеизвестны, однако остановимся на них подробнее, так как именно необходимость выполнения их обуславливала определение ампера, предложенное Комитетом по делам мер и измерительных приборов:

1. Радиус проводов должен быть ничтожно мал по сравнению с расстоянием между проводами.

2. Магнитное поле взаимодействующих токов должно совпадать с полем тока в бесконечно протяженных параллельных проводах.

Последнее условие выполняется, если длина проводов много больше расстояния между ними и если приняты меры к устранению посторонних магнитных полей (например, земного поля, полей каких-либо электротехнических устройств и т. п.), к числу которых может быть отнесено и магнитное поле поляризуемой вещественной среды.

В самом деле, если в поле проводов находится магнитно-поляризуемое вещество, то в дополнение к полю токов появится магнитное

поле, обусловленное магнитными моментами частиц этого вещества.

Если поле токов в какой-либо точке пространства при отсутствии поляризуемого вещества равно B_0 , то дополнительное поле будет равным:

$$B_d = k B_0,$$

если изотропное однородное поляризуемое вещество заполняет всю область, на которую распространяется магнитное поле токов.

Результирующее поле

$$B = B_0 + B_d = (1 + k) B_0$$

или

$$B = \mu B_0.$$

Величины k (или $\chi = \frac{k}{4\pi}$) и μ , входящие в

уравнения (11) и (12), носят названия восприимчивости и проницаемости. Из современной теории поля в поляризующихся средах хорошо известно, что k , χ и μ являются величинами, характеризующими именно поляризационные свойства вещественной среды, а их наименования — восприимчивость и проницаемость — связаны с отошедшими в историю прежними представлениями об электромагнитных процессах.

Дополнительное поле обуславливает, конечно, и дополнительную силу, поэтому при наложении однородной сплошной магнитно-поляризующей среды в формулах, выражающих силу взаимодействия, появляется дополнительный множитель μ . Так, вместо (9) и (10) следует в указанных условиях писать:

$$F = \mu \cdot 1,02 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{а}^2} \frac{2i^2 b}{r},$$

$$F = \mu \cdot 10^{-7} \frac{\text{ньютон}}{\text{а}^2} \frac{2i^2 b}{r}. \quad (11)$$

Заметим, что если бы поляризуемая среда не была однородной во всей области существования поля взаимодействующих токов, то влияние учитывалось бы более сложным множителем.

5. Магнитная проницаемость пустоты

В выражениях, подобных только что приведенным (9,1) и (10,1), рядом с μ стоит еще один множитель, зависящий от выбранной формы записи уравнений и от выбранной системы единиц. Если среда, на которую распространяется магнитное поле взаимодействующих токов, не поляризуется, т. е. если в ней не возникают дополнительные токи, создающие дополнительное поле, то множитель μ обращается в единицу и остается только второй множитель. Нельзя его назвать магнитной проницаемостью поляризуемой среды, безвоздушного пространства, вакуума, пустоты или эфира? т. е. нельзя полагать такой проницаемостью, обозначаемой множителем

$$1,02 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{а}^2} = \mu_0$$

$$10^{-7} \frac{\text{ньютон}}{\alpha^2} = \mu_0?$$

тановясь на чисто формальную точку зрения, можно ответить утвердительно. Можно ведь называть золотом, а золото — медью? Это формальной точки зрения можно, но при этом, конечно, медь не приобретет свойств золота. Однако такое переименование приведет к выводу, ничем не оправдываемым практическими затруднениями.

μ_0 имеют совершенно разный физический смысл. μ_0 характеризует наличие дополнительных микроскопических („связанных“) токов, участвующих в создании магнитного поля. μ_0 характеризует величину электродинамического взаимодействия токов, и соотношение между μ_0 и сопровождающим их магнитным полем. μ_0 является электродинамической постоянной, μ — же, как гравитационная постоянная; μ является характеристикой, позволяющей определять намагниченность вещества.

Электродинамическая постоянная (μ_0) имеет свое значение, зависящее от выбора системы единиц и формы записи соответствующих уравнений. В свою очередь, выбор определенной формы записи уравнений электродинамики и вычисление определенного значения этой постоянной (μ_0) однозначно определяет единицу тока, при этом уже выбраны единицы массы, длины и времени.

В электромагнитной системе *см г сек* значение электродинамической постоянной было выбрано равным единице.

В системе *м кг сек* единица тока будет амперу абсолютному, если принять:

$$\mu_0 = 10^{-7} \frac{\text{ньютон}}{\alpha^2} \quad (13)$$

В рационализованной форме записи уравнений электродинамики, к которой и относятся уравнения (10) и (10,1). При „рационализации“ уравнений уравнение (10) примет следующий вид:

$$F = \mu_0 4\pi 10^{-7} \frac{\text{ньютон}}{\alpha^2} \frac{i^2 b}{2\pi r} \quad (10,2)$$

В последнем случае электродинамическая постоянная принимает значение

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{ньютон}}{\alpha^2} \quad (14)$$

То, что введение 4π в знаменатель должно быть скомпенсировано появлением 4π в числителе, ясно из предложенных определений единиц. В старой практической системе основывалось (или основывалось) на том, что фиксировать вполне определенное значение единиц длины и времени (*м, кг, сек*) и численное значение электродинамической постоянной. Оно было дано в чрезвычайно искусственном, соответствующем с формальным отождествлением электродинамической постоянной с магнитной проницаемостью пустоты или ваку-

ума: если магнитная проницаемость вакуума равна $4\pi \cdot 10^{-7}$, то, значит, в качестве единицы для проницаемости принимается величина в $10^7/4\pi$ раз более крупная; такая проницаемость (названная „магном“) и предлагалась в качестве четвертой основной единицы, определяющей в совокупности с *м, кг и сек* все остальные единицы практической системы.

6. Определение абсолютного ампера. Несостоятельность предложения (впрочем, уже отклоненного) определять единицы практической системы на основании „магна“ уже отмечалась выше. Но и выдвинутое Комитетом мер и измерительных приборов (взамен магна) новое определение ампера¹ представляется также мало пригодным.

В самом деле, это определение основано на формуле взаимодействия между проводами с током, неоднократно приводившейся выше [уравнения (5), (10) и (10,1)].

Условия применимости этой формулы нашли свое отражение и в том, что упомянутом определении.

Но эти условия говорят о том, что реально нельзя пользоваться формулой (5) для определения ампера. И на самом деле, в метрологических лабораториях при определении ампера по силе взаимодействия между проводами, во-первых, применяют не бесконечно длинные параллельные провода ничтожно малого сечения, а катушки с проводами большого сечения; во-вторых, самый опыт ставят не в безвоздушном пространстве — катушки расположены в воздухе, влияние которого чрезвычайно мало, и в случае надобности всегда может быть учтено соответствующим поправочным коэффициентом; в-третьих, силу взаимодействия определяют не по ускорению, а из сопоставления с другой уравновешивающей силой и т. д. Наконец, силу взаимодействия между проводами вычисляют по формуле, выраженной в дифференциальной форме, даже не упоминаемой в предлагаемом определении.

Таким образом, предложенное Комитетом по делам мер и измерительных приборов определение *не дает никакого представления о том, как же в действительности определяется единица тока.*

В определение абсолютного ампера должно входить прежде всего указание на его связь с известной единицей системы *см г сек*, затем в нем должно содержаться указание на практически применяемый метод определения ампера в метрологических лабораториях СССР, наконец, в этом определении должно быть указано принципиальное существование возможности определения абсолютного ампера другими методами, обеспечивающими (как и принятый в настоящее время метод) требуемое значение величины абсолютного ампера. В соответствии со сказанным мне представляется наиболее приемлемым определение, подобное следующему:

¹ См. текст этого определения в статье А. Я. Егермана (стр. 68, третий абзац).

Ампер* (абсолютный) — единица тока абсолютной практической системы *м кг сек*, равная одной десятой единицы тока электромагнитной системы *см г сек* (системы *CGS—M*).

В СССР она определяется по силе взаимодействия между проводниками, несущими ток, уравновешиваемой силой земного притяжения, действующей на гирию известной массы. Названные силы сравниваются на равноплечих рычажных весах, называемых токовыми весами.

Во Всесоюзном метрологическом институте хранится подробное описание (спецификация) токовых весов и расчет коэффициента пропорциональности между квадратом протекающего через провода тока и силой взаимодействия между проводниками.

При вычислении силы взаимодействия исходят из выражения основных законов электродинамики с точно заданными (произвольно выбранными) множителями пропорциональности.

Значение этих множителей выбирается таким, чтобы сила взаимодействия между параллельными проводниками с током в 1 а была равна одной десятиллионной доле единицы силы в системе *м кг сек* при расстоянии между проводниками в 2 м и при следующих дополнительных предположениях: расстояние всех точек сечения одного провода до оси другого провода практически одинаково, и магнитное поле в рассматриваемой области взаимодействия между проводниками практически совпадает с магнитным полем бесконечно протяженных параллельных проводов в среде, магнитная проницаемость которой равна единице.

Условие, изложенное в предыдущем пункте, равносильно следующей записи дифференциаль-

ного закона электродинамического взаимодействия:

$$dF = C \frac{[\delta_1 \delta_2] r}{r^3} dV_1 dV_2,$$

где δ_1 и δ_2 — плотность тока в первом и во втором взаимодействующих элементах;

dV_1 и dV_2 — объемы этих элементов;

r — радиус, проведенный из первого элемента во второй;

dF — сила, испытываемая первым элементом;

C — электродинамическая постоянная, равная 10^{-7} кг м/а² сек².

Принципиально возможен любой удобный для метрологической практики способ определения ампера (абсолютного), обеспечивающий совпадение определяемой единицы с 1/10 единицы системы *см г сек*.

Литература

1. К. Дж. Максвелл. Траклат об электричестве и магнетизме.
2. С. Ф. Маликов. Практические электрические единицы международные и абсолютные. Госэнергоиздат, 1947.
3. Электричество, № 1, 1948; № 1 и 12, 1949.
4. 100 лет службы мер и весов в СССР. Издательство по делам мер и измерительных приборов, Госстандарт, 1945.
5. Описание токовых весов (Труды ВНИИМ за 1947 г. тема № 24, б, Ленинград).

ОТ РЕДАКЦИИ

В мае 1949 г. на совещании в Академии наук СССР при участии представителей Комитета по делам мер и измерительных приборов СССР и других организаций обсуждался проект основных положений, предусматривающих установление общей системы единиц измерений и, в частности, выбор основной электромагнитной единицы.

В связи с тем, что определение понятия ампера — единицы измерения электрического тока, принятой в указанном проекте, — вызывает ряд существенных возражений, редакция журнала «Электричество» решила продолжить критическое рассмотрение вопроса об основной единице электрического тока с целью достижения наилучшей с научной точки зрения формулировки. Помещая статьи А. Я. Егермана и К. М. Полианова, редакция приглашает читателей принять участие в обсуждении выдвинутых в этих статьях вопросов.



Новые стандарты на стальные изделия для электрических установок

«Провода стальные многопроволочные для электрических линий передач» (ГОСТ 1).

Стандарт введен взамен ОСТ/НКТП 8173/1001 и распространяется на провода, свитые из стальных проволочек и применяемые в электрических сетях для передачи электрической энергии.

Стандарт предусматривает 10 марок проводов, в числе 5 марок из проволочек, изготовляемых из обыкновенной углеродистой стали с индексом (проволочка стальной), и 5 марок — из медистой проволочки с индексом ПМС (провод медистый стальной).

Наименование и марки проводов должны соответствовать табл. 1.

Таблица 1

Диаметр проволоки	Номинальный диаметр, мм	Допускаемое отклонение, мм	Число проволочек в проводе	Теоретическая площадь сечения проволоки, мм ²	Расчетный диаметр проволоки, мм	Расчетный вес 1 000 м провода, кг
2,5			5	24,6	5,6	194,3
2,6			7	37,2	7,8	295,7
2,3		+0,11 -0,05	12	49,8	9,2	396,0
2,3			19	78,9	11,5	631,6
1,8			37	94,0	12,6	754,8

В обозначении марок проводов числа после запятой обозначают номинальную (теоретическую сечение) площадь сечения провода в мм². Впервые введены в проволочках сечением 120 мм² для применения которых для сельской электрификации является весьма актуальным. Исключены проволочки сечением 120 мм², как не имеющие ни избытка, ни недостатка.

Для проволочки являются две марки из углеродистой стали: обыкновенная и марганцевая. Содержание углерода в обеих марках не более 0,11%; марганца — не более 0,1%. Ограничение содержания этих элементов введено с целью уменьшения удельного электрического сопротивления стали; при этом установленные пределы прочности обеспечиваются соответствующим волочением. Содержание вредных элементов установлено в нормах, достигнутых в условиях производства массовой продукции: серы — не более 0,05%; фосфора — не более 0,045%. Ограничено также содержание хрома (не более 0,15%) и никеля

(не более 0,20%). Содержание меди установлено в обыкновенной стали до 0,2%; в медистой 0,2 ... 0,4%; медь вводится для повышения коррозионной стойкости проволоки.

Требования по механическим свойствам проволочки по сравнению с нормами ОСТ/НКТП 8173/1001 повышены: минимальная норма предела прочности при испытании на растяжение для проволоки диаметром 2,3 ... 2,6 мм установлена 65 кг/мм² (вместо 60 кг/мм²), для проволоки диаметром 1,8 мм — 70 кг/мм². С целью гарантии против хрупкости введены обязательные нормы по пластическим характеристикам стали: при испытании на растяжение образца проволоки с расчетной длиной 200 мм определяется относительное удлинение, которое должно быть не менее 5% для проволоки диаметром 2,3 ... 2,6 мм и не менее 3,5% для проволоки диаметром 1,8 мм. Помимо этого проволока испытывается на перегиб по ГОСТ 1579-42, причем после восьми перегибов не должно происходить разрушения.

Стандартом усилен контроль плотности и прочности цинкового покрытия проволоки.

Максимальное удельное электрическое сопротивление постоянному току при температуре +20° С установлено в 0,138 ом · мм²/м для обыкновенной проволоки и в 0,146 ом · мм²/м для медистой.

Электрическое сопротивление переменному току определяется для тока в 1,5, 10, 15, 20, 30 и 50 а по методике, согласованной между поставщиком и потребителем.

ГОСТ устанавливает уточненные нормы активного сопротивления проводов стандартных марок переменному току при температуре +20° С. Различия в значениях сопротивления для проволоки из обыкновенной и из медистой стали незначительно, поэтому приняты единые средние нормы (табл. 2 и 3 рис. 1 и 2).

До 1 мая 1952 г. разрешено производить поставку без испытаний по определению активного и внутреннего индуктивного сопротивлений проводов.

Внедрение нового стандарта на стальные многопроволочные провода, являющиеся основным видом голых проводов для сельских воздушных электросетей, должно дать значительный экономический эффект. Введение проводов сечением 25 мм² восполняет разрыв в шкале стальных проводов при переходе от сплошных к одножильным.

Применение проводов из медистой проволоки увеличит срок их службы на 40 ... 50%, что соответственно уменьшит потребность в проводах и понизит расходы по ремонту воздушных линий передач.

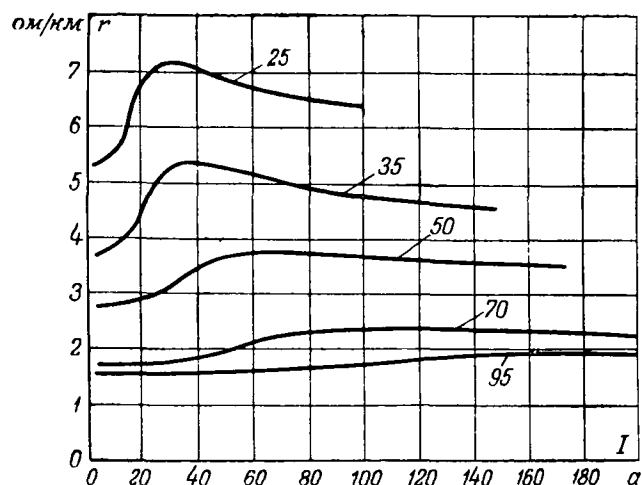


Рис. 1. Активное сопротивление проводов марок ПС и ПМС в зависимости от тока. Цифры у кривых — сечения проводов.

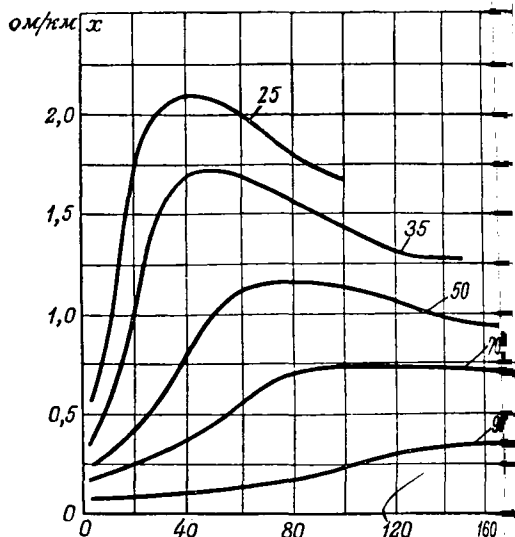


Рис. 2. Внутреннее индуктивное сопротивление проводов марок ПС и ПМС.

Таблица 2

Активное сопротивление провода, ом/км

Ток, а	Марка провода				
	ПМС-25, ПС-25	ПМС-35, ПС-35	ПМС-50, ПС-50	ПМС-70, ПС-70	ПМС-95, ПС-95
1	5,25	3,66	2,75	1,70	1,55
1,5	5,26	3,66	2,75	1,70	1,55
2	5,27	3,66	2,75	1,70	1,55
3	5,28	3,67	2,75	1,70	1,55
4	5,30	3,69	2,75	1,70	1,55
5	5,32	3,70	2,75	1,70	1,55
6	5,35	3,71	2,75	1,70	1,55
7	5,37	3,73	2,75	1,70	1,55
8	5,40	3,75	2,76	1,70	1,55
9	5,45	3,77	2,77	1,70	1,55
10	5,50	3,80	2,78	1,70	1,55
15	5,97	4,02	2,80	1,70	1,55
20	6,70	4,40	2,85	1,72	1,55
25	6,97	4,89	2,95	1,74	1,55
30	7,10	5,21	3,10	1,77	1,56
35	7,10	5,36	3,25	1,79	1,56
40	7,02	5,35	3,40	1,83	1,57
45	6,92	5,30	3,52	1,88	1,57
50	6,85	5,25	3,61	1,93	1,58
60	6,70	5,13	3,69	2,07	1,58
70	6,60	5,00	3,73	2,21	1,61
80	6,50	4,89	3,70	2,27	1,63
90	6,40	4,78	3,68	2,29	1,67
100	6,32	4,71	3,65	2,33	1,71
125	—	4,60	3,58	2,33	1,83
150	—	4,47	3,50	2,38	1,87
175	—	—	3,45	2,23	1,89
200	—	—	—	2,19	1,88

Внутреннее индуктивное сопротивление провода

Ток, а	Марка провода			
	ПМС-25, ПС-25	ПМС-35, ПС-35	ПМС-50, ПС-50	ПМС-70, ПС-70
1	0,54	0,33	0,23	0,16
1,5	0,55	0,34	0,23	0,16
2	0,55	0,35	0,24	0,17
3	0,56	0,36	0,25	0,17
4	0,59	0,37	0,25	0,18
5	0,63	0,40	0,26	0,18
6	0,67	0,42	0,27	0,19
7	0,70	0,45	0,27	0,19
8	0,77	0,48	0,28	0,20
9	0,84	0,51	0,29	0,20
10	0,93	0,55	0,30	0,21
15	1,33	0,75	0,35	0,23
20	1,63	1,04	0,42	0,25
25	1,91	1,32	0,49	0,27
30	2,01	1,56	0,59	0,30
35	2,06	1,64	0,69	0,33
40	2,09	1,69	0,80	0,37
45	2,08	1,71	0,91	0,41
50	2,07	1,72	1,00	0,45
60	2,00	1,70	1,10	0,55
70	1,90	1,64	1,14	0,65
80	1,79	1,57	1,15	0,70
90	1,73	1,50	1,14	0,72
100	1,67	1,43	1,13	0,73
125	—	1,29	1,04	0,73
150	—	1,27	0,95	0,73
175	—	—	0,94	0,71
200	—	—	—	0,69

2. «Электроды стальные для дуговой сварки и наплавки» (ГОСТ 2523-51).

Стандарт введен взамен ГОСТ 2523-44. Новый стандарт предусматривает значительное расширение ассортимента электродов, которые в зависимости от назначения подразделены на следующие виды:

1) для сварки конструкционных сталей;

2) для сварки легированных сталей с особыми свойствами;

3) для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами.

Для сварки конструкционных сталей предусмотрено 13 типов электродов следующих групп:

а) Для сварки малоуглеродистой и низколегированной стали предусмотрено 4 типа электродов.

Э-38, Э-42 и Э-42А, из них тип Э-38 впервые. В обозначении типов цифр соответствуют гарантированной величине предела прочности при растяжении шва и сварного соединения; буква А означает повышенную пластичность (при испытании на растяжение металла шва или на ударное соединение) и ударную вязкость шва.

Для сварки среднеуглеродистой и низкоуглеродистой стали установлено 6 типов электродов: Э-50, Э-50А, Э-55, Э-55А, Э-60 и Э-60А, из которых вновь типы Э-55 и Э-60А.

Для сварки конструкционной стали повышенной прочности установлено 3 типа электродов: Э-70, Э-85 и Э-100, из них два последних впервые и предназначены для стали высокой прочности.

Для сварки легированных сталей с особыми свойствами установлено 14 типов электродов следующих групп:

Для сварки перлитных жаропрочных сталей предусмотрено 4 типа: ЭП-50, ЭП-55, ЭП-60 и ЭП-70, в обозначении буква П указывает на перлитную сталь; цифры — гарантируемое значение предела прочности. Марка ЭП-50 предназначена для сварки молибденовой стали марки ЭП-55 — хромомолибденовой стали марки ЭП-60 — хромомолибденовой стали марки ЭП-70 — хромоникелемолибденовой стали марки 15ХНЗМ.

Для сварки аустенитных жаропрочных, жаростойких и нержавеющей сталей марок Э-Х18Н9Б, Х18Н9М, Х25Н15, Х25Н20 и ЭМФ установлено 6 типов электродов: ЭА1Б, ЭА1М, ЭА-2, ЭА-3 и ЭА-4.

В обозначении типа электрода буквы указывают: А — аустенитная сталь; Б — содержание в ней бора; М — содержание молибдена.

Электроды типов ЭА-2 и ЭА-3 могут применяться также для сварки конструкционной специальной стали.

Для сварки высокохромистых низкоуглеродистых ферритных и ферритомартенситных жаропрочных и нержавеющей сталей марок Х-13, Х-25 и Х-30 установлено 4 типа электродов: ЭФ-13, ЭФ-17, ЭФ-25 и ЭФ-30. В обозначении буква Ф — ферритная сталь; цифры — среднее содержание в ней хрома.

Для наплавки поверхностных металлических покрытий с особыми свойствами введены в стандарт 11 типов электродов следующих групп:

Для наплавки режущего инструмента из быстрорежущей стали (или ее заменителей) введен один тип электрода: ЭНР-62. В обозначении: Н — наплавка; Р — режущий инструмент; 62 — гарантированная норма твердости (R_c) наплавленного металла после специальной термической обработки.

Для наплавки износостойких поверхностей, работающих при повышенных температурах, предусмотрены: хромистой, хромомарганцовистой, хромоникелевой и хромовольфрамовой

предусмотрено 3 типа электродов: ЭНГ-35, ЭНГ-40 и ЭНГ-50. В обозначении: Н — наплавка; Г — горячий; цифры — минимальное значение R_c наплавленного металла без термической обработки.

в) Для наплавки износостойких поверхностей, работающих при обычных температурах, высокомарганцовистой сталью типа Гадфильда, хромистой, хромомарганцовистой и кремнемарганцовистой сталью, а также сплавом типа Сормайт, установлено 5 типов электродов: ЭНХ-20, ЭНХ-25, ЭНХ-30, ЭНХ-45 и ЭНХ-50. Обозначения подобны предыдущим.

г) Для наплавки эрозионстойких поверхностей, работающих при высоких температурах и агрессивных средах, сплавами типа стеллитов установлено 2 типа электродов: ЭНЭ-35 и ЭНЭ-45. В обозначении буква Э — эрозионстойкий сплав; цифры — гарантированная норма твердости (R_c) наплавленного металла без термической обработки.

Каждому типу электродов может соответствовать одна или несколько марок, характеризующихся маркой проволоки, из которой изготовлены электроды, составом покрытия, технологическими свойствами и свойствами наплавленного металла.

В разделе стандарта «Размеры» фиксирован сортамент электродов, указанный в табл. 4.

Таблица 4

Диаметр электрода, мм	Длина электродов, мм	
	нормальных	высокого омического сопротивления с большим количеством органических составляющих в покрытии
1; 1,2; 1,6 и 2	225 или 250	225 или 250
2,5 и 3	350	225 или 250
3,5 и 4	400 или 450	350
5; 6; 7; 8; 9 и 10	450	350 или 450

Под диаметром электрода понимается диаметр стрежня без покрытия. Допускается по согласованию сторон изготовление электродов размеров, не указанных в табл. 4.

В разделе «Технические условия» установлены требования к плотности и прочности покрытия электродов, прочность проверяется при свободном падении электрода плашмя на гладкую стальную плиту с высоты 1 м для электродов диаметром до 4 мм и с высоты 0,5 м — для более крупных. Фиксированы предельные нормы содержания вредных примесей — серы и фосфора — в металле шва или в наплавленном поверхностном слое.

В разделе «Методы испытаний» уточнен порядок и даны схемы вырезки образцов из сварных пластин стали для определения механических свойств металла шва и сварного соединения. Приведены описания методов контроля технологических свойств электродов, предназначенных для сварки или наплавки поверхностных слоев.

Инж. Д. В. КРОТКОВ

Провода стальные многопроволочные для воздушных электрических линий передач

Инж. А. М. ГАНЕЛИН

ВИЭСХ

В настоящее время при осуществлении электроснабжения сельских районов основным проводниковым материалом является сталь. При малой плотности нагрузки на единицу площади и малом коэффициенте использования установленной мощности, имеющих место в сельской электрификации, применение медных проводов нецелесообразно. Заменяя медный провод эквивалентным ему по сопротивлению стальным проводом, получаем, при удовлетворительной электропроводности, линию с высокими механическими свойствами, отличающуюся широкой доступностью и дешевизной. Преимущества стальных проводов заключаются прежде всего в их дешевизне и большой механической прочности. К недостаткам линии со стальными проводами следует отнести их повышенное сопротивление постоянному току (в 7...8 раз больше, чем медных проводов), а также появление потерь на гистерезис и поверхностный эффект при переменном токе. Следствием последних является возрастание электрического сопротивления проводов при переменном токе по сравнению с таковым при постоянном токе и изменение электрического сопротивления проводов в зависимости от плотности нагрузки.

Многопроволочные стальные провода для воздушных электрических линий до последнего времени выпускались по устаревшему ОСТ/НКТП—8173/1003. В 1948 г. в химический состав исходного металла, идущего на изготовление этих проводов, были внесены изменения. С целью повышения их коррозионной устойчивости в состав стали включены незначительные присадки меди (0,2...0,4%). Естественно поэтому, что электрические характеристики многопроволочных стальных проводов, приведенные в ОСТ 8173, не соответствуют действительным условиям.

Шкала сечений стальных проводов, соответствующая ОСТ 8173, не удовлетворяет нуждам их основного потребителя — сельской электрификации. При рассмотрении сортамента проводов с омическим сопротивлением $R \geq 1$ ом/км, применяемых в сельских электрических сетях, А. Г. Захарин установил, что вследствие больших интервалов между сечениями проводов трудно в ряде случаев осуществить экономичность выбора провода. Действительно, при переходе от однопроволочного провода ЖС5 сечением 19 мм² к многопроволочному проводу ЖС-35 сечением 35 мм² отношения

проводимостей смежных сечений достигает $m = \frac{R_{n+1}}{R_n}$.

Это приводит не только к излишней затрате металла, но и удорожает стоимость строительства сетей. Расчеты А. Г. Захарина показали, что для сельских электрических линий нет необходимости выдвигать требование о снижении интервала между сечениями ниже $m = 1,4$.

Все эти соображения и легли в основу пересмотра ОСТ 8173. Решение поставленной задачи велось в двух направлениях: 1) проверка соответствия таблиц и кривых ОСТ проводам, выпускаемым ныне промышленностью; 2) заполнение пробела в шкале сечений проводов путем разработки новой конструкции провода.

Снятие электрических характеристик проводов. В предыдущих работах для измерений сопротивления проводников переменному току использовались два принципиально различных метода: 1) метод амперметра, вольтметра, ваттметра; 2) компенсационный метод. Сравнение показывает, что компенсационный метод обладает рядом преимуществ:

большая точность измерений, несложная обработка данных и т. д.

Для измерений была принята схема с использованием низковольтного комплексного потенциометра типа АИТ. Аппарат для проверки измерительных трансформаторов сконструирован советскими инженерами и выпускается заводами Министерства электропромышленности СССР. Расширения пределов измерения аппарата АИТ, а также повышения его точности отсчета, использован ступенчатый потенциометр, состоящий из индуктивного сопротивления, изготовленного в виде воздушного трансформатора и активного сопротивления, выполненного в виде безреактивного шунта. Секционированные активное и индуктивное сопротивления могут включаться в измерительную цепь непосредственно либо через катушки переключений. Последние соединены по потенциометрической схеме.

На рис. 1 изображена принципиальная схема измерения электрических характеристик стальных проводов. Эта схема условно может быть разбита на три самостоятельные части: создание нагрузки, измерение сопротивления проводов, контроль температуры.

Изменение величины тока нагрузки на исследуемом образце провода 5 обеспечивается регулируемым трансформатором 6. Для питания измерительных приборов грузочную часть схемы помещен многопредельный трансформатор тока 3, питающий промежуточный трансформатор и фазосдвигающее устройство аппарата АИТ. Также активное сопротивление и первичную обмотку взаимной индуктивности в эталонном ступенчатом потенциометре 2. Компенсационные провода соединены с измерительной частью приборов, включенных последовательно. Изменением активного и индуктивного сопротивлений добиваются того же падения напряжения на них, как и на исследуемом образце. Равенство па-

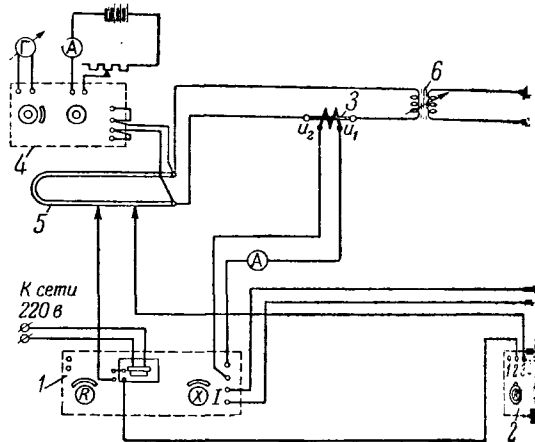
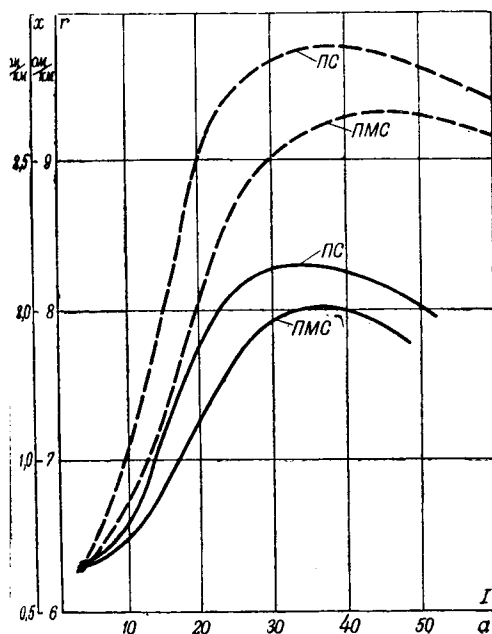


Рис. 1. Принципиальная схема измерения активного и индуктивного сопротивлений.

1 — аппарат АИТ; 2 — эталонный ступенчатый потенциометр; 3 — многопредельный трансформатор тока; 4 — мост сопротивлений; 5 — исследуемый образец провода; 6 — регулируемый трансформатор.



2. Влияние химического состава провода на его активное и индуктивное сопротивления ($q=25 \text{ мм}^2$, 5 жил с шагом скрутки $t=100 \text{ мм}$).

провод из обыкновенной стали; ПМС — из медистой. Пунктиром даны кривые индуктивного сопротивления.

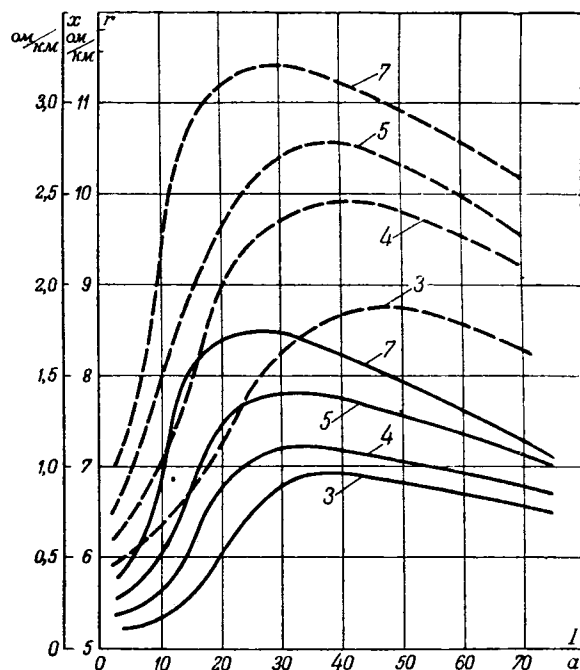


Рис. 3. Влияние числа жил в проводе на его активное и индуктивное сопротивления ($q=25 \text{ мм}^2$, шаг скрутки $t=100 \text{ мм}$). Цифры около кривых показывают число жил. Пунктиром даны кривые индуктивного сопротивления.

измеряется вибрационным гальванометром, показывающим в момент равновесия наименьший размык зайчика. Для контроля температуры исследуемого образца использованы мост сопротивлений 4 и проградуированные жары. В качестве изотермической среды при измерении применяется трансформаторное масло.

Электрические свойства проводов. Электрические свойства проводов прежде всего зависят от их химического состава и структуры. Кремний, марганец и фосфор увеличивают удельное омическое сопротивление, понижают магнитную проницаемость и увеличивают потери на гистерезис. Максимальным содержанием углерода является 0,07%. Были подвергнуты испытанию провода из обыкновенной и медистой сталей, разнящихся только содержанием меди.

На полученным материалам можно установить влияние химического состава на электрические характеристики проводов. На рис. 2 приведена зависимость от тока активного и индуктивного сопротивлений проводов из обыкновенной и медистой стали. Как следует из кривых, разница в сопротивлении не превышает 15%. Отсюда может быть сделан вывод, что даже при незначительных присадках меди существенно улучшает электрические качества провода. С этой точки зрения представляется весьма желательными дальнейшие исследования в области электрических качеств стальных проводов с увеличением присадки меди и определения оптимальной нормы таких присадок.

Конструкция проводов — число жил и шаг скрутки, существенно влияют на токораспределение в проводе. При производстве многопроволочных проводов наиболее распространена одинарная семижильная конструкция, где все проволоки, кроме центральной, получают спираль. Исходя из соображений эффективности использования технологического оборудования, наиболее удобным следует считать трех-, четырех-, пяти- и шестипроволочную конструкцию провода.

В нашем предложении были изготовлены провода с 25 мм^2 различной конструкции: с разным числом жил и разным шагом скрутки. Для всех изготовленных проводов были сняты электрические характеристики.

На рис. 3 приведены кривые активного и индуктивного сопротивлений проводов сечения 25 мм^2 и с числом жил: 3, 4, 5, 7, 11.

Активное и внутреннее индуктивное сопротивление провода сечением 25 мм^2 , ом/км

Число жил	Ток, а									
	10		20		30		40		50	
	r	x	r	x	r	x	r	x	r	x
3	6,99	2,30	8,53	3,39	8,45	3,39	8,20	3,19	8,08	3,06
4	5,91	1,35	7,48	2,46	7,75	2,60	7,74	2,66	7,64	2,62
5	5,55	0,94	6,62	1,79	7,02	2,00	7,08	2,00	7,16	2,12
7	5,35	0,05	5,97	1,17	6,40	1,46	6,67	1,60	6,78	1,68

Как следует из таблицы, с увеличением числа жил активное и индуктивное сопротивления проводов резко уменьшаются. Это объясняется действием поверхностного эффекта.

Активное сопротивление провода, выраженное через длину электромагнитной волны, имеет вид:

$$r = \frac{\lambda \cdot l}{\gamma u}$$

где λ — длина электромагнитной волны;
 l — длина проводника;
 γ — удельная проводимость;
 u — периметр.

Из формулы следует, что чем больше периметр провода и глубина проникновения электромагнитной волны в провод, тем меньше активное сопротивление этого провода. В самом деле, если для трехжильного провода сечением 25 мм^2 с периметром $u_3 = 2,5 \pi d$ активное сопротивление составляет 100%, то для семижильного провода этого же сечения с периметром $u_7 = 4,5 \pi d$ активное сопротивление будет всего 79%.

Из возможных типов скрутки проводов наиболее употребительна та, при которой провод составляется из проволок одного и того же диаметра. Для проводов крупных сечений (от 35 мм^2 и выше) конструкция решена работами прежних лет¹. Наиболее эффективная конструкция

¹ С. М. Браггин. Железные провода для линий электропередачи, ОНТИ, 1934.

проводов мелких сечений (меньше 35 мм^2) не определена. Практическое значение для провода 25 мм^2 приобретают следующие комбинации скрутки: трехжильная с диаметром жилы $3,2 \text{ мм}$, четырехжильная с диаметром жилы $2,8 \text{ мм}$, пятижильная с диаметром жилы $2,6 \text{ мм}$, семижильная с диаметром жилы $2,2 \text{ мм}$.

При выборе конструкции провода сечением 25 мм^2 следует учитывать не только механические и электрические характеристики, но также и весь комплекс технико-экономических вопросов: стоимость изготовления проводов, затраты металла, эксплуатационные расходы. Анализ калкуляционных данных показал, что удельная стоимость провода, т.е. стоимость 1 км , отнесенная к 1 мм^2 сечения, снижается по мере увеличения диаметра отдельных проволок и уменьшения числа жил в проводе. С другой стороны, рассмотрение значений коэффициента экономического использования провода, т.е. степени его использования как по стоимости, так и по затратам металла, приводит к пятижильной конструкции. Последняя лучше других отвечает комплексным технико-экономическим требованиям, предъявляемым к многопроволочным стальным проводам.

В качестве шага скрутки принимается двадцатидвукратная величина диаметра провода. Исследование влияния шага скрутки на электрические характеристики провода с разным числом жил подтвердило, что рациональным шагом скрутки может считаться $100 \dots 150 \text{ мм}$, т.е. $18 \dots 26$ диаметров провода, когда активное и индуктивное сопротивления уменьшаются примерно на $4 \dots 7\%$ по сравнению с любыми другими вариантами шага скрутки.

Таким образом, в результате исследования были установлены оптимальные конструктивные качества стальных проводов, положенные в основу сортамента ГОСТ 5800-51.

Новый сортament проводов, совершенно очевидно, даст народнохозяйственный эффект за счет экономии металла, а также за счет снижения электрических потерь в линии. Введением провода сечением 25 мм^2 в сортament многопроволочных витых проводов снижается интервал сечений по сопротивлению до величины $m = 1,55$ и полностью исключается применение сплошных проводов диаметром 5 и 6 мм . Предварительные расчеты позволяют считать, что в среднем на 1 км трехфазной электрической линии экономится около 40 кг металла. В общем случае снижение потерь в 1 км линии достигает $8 \dots 10\%$.

В ГОСТ 5800—51 приведены графики и таблицы для определения активного и внутреннего индуктивного сопротивлений стальных проводов. Они имеют ряд отличий от таких же графиков и таблиц ОСТ 8173:

1. По активному сопротивлению — расхождение кривых ГОСТ 5800—51 и кривых ОСТ 8173 составляет от -10% до $+11\%$.

2. Кривые индуктивного сопротивления ГОСТ при больших плотностях тока ($\sigma = 2 \dots 3 \text{ а/мм}^2$) ются от таких же кривых ОСТ 8173 более чем

3. В отличие от кривых ОСТ 8173, где индуктивное сопротивление начинается с нуля, ГОСТ 5800—51 начинаются с некоторой величиной от нуля.

Механические качества проводов. В результате проведенных механических испытаний и металлографических исследований установлено, что провода имеют перлитную структуру. 100% всех исследованных имеют предел прочности на растяжение больше 60 кг/мм^2 (из них 64% образцов с $\sigma > 70 \text{ кг/мм}^2$). Более высокий предел прочности испытанных проволок по сравнению с требованиями ОСТ 8173 объясняется холодной прокаткой. Отсутствие отжига несколько увеличивает прочность проволоки. В случае медистой, коррозионной проволоки это обстоятельство практического значения не имеет. Создаваемый в результате холодной прокатки наклеп значительно снижает магнитную проницаемость и улучшает электрические качества [так как $\chi_{\text{вн}}$]

Предел прочности для проволок, из которых сплетают провода, повышен с 60 кг/мм^2 до $65 \dots 70 \text{ кг/мм}^2$. Таким образом увеличен предел прочности на растяжение для проводов, что позволит при малых сечениях увеличить пролет электрических линий передач, соответствующим образом снизив стоимость электрической линии.

Одним из способов повышения долговечности является оцинковка. Ее целесообразность подтверждается тем, что в самых неблагоприятных условиях срок сохранения стальных проводов в смешанных условиях промышленного района и морского климата срок сохранения стального покрытия повышается до $10 \dots 12$ лет. В благоприятных условиях мягкого климата и в сельской местности этот срок увеличивается до 15 и более лет. Провода, подвергнутые оцинковке, имеют индуктивное сопротивление на $8 \dots 10\%$ меньше, чем неоцинкованные. ГОСТ предусматривает обязательность оцинковки. Следует отметить, что технология производства оцинковки достаточно совершенна. На металлургических заводах слой оцинковки толщиной в $0,023 \dots 0,030 \text{ мм}$ наносится горячим способом. Проволока сначала пропускается через нагревательные печи, а затем через расплавленный цинк. Вследствие этого холоднотянутая, нагартованная проволока после такой термообработки, степень наклепа ее уменьшая, улучшает электрические качества несколько ухудшаются.

С точки зрения улучшения электрических качеств стального провода, а также экономии цинка было бы целесообразно организовать гальваническое оцинковывание, в результате чего уменьшится активное и индуктивное сопротивление провода.



К вопросу об экономической плотности тока

(Электричество, № 11, 1950, № 6, 1951)

Кандидат техн. наук Б. Л. ЭРЛИХМАН

Москва

Основные принципы расчета. Задача технико-экономического выбора параметров (сечений электропроводов и размеров деривационных трубопроводов и т. п.) является общей для различных отраслей народного хозяйства. В практике проектирования и строительства непрерывно происходит выбор технических вариантов и необходимо найти пути к ликвидации «невидимых» перерасходов государственных средств в виде чрезмерных капиталовложений или излишних ежегодных затрат. Ряд дискуссий на страницах научно-технических и технических журналов¹ показывает актуальность этой задачи.

Главный ключ к решению проблемы лежит в области математики. Некоторые экономисты либо исходили из закономерностей, аналогичных тем, какие имеют место при выборе параметров и вариантов в капиталистическом хозяйстве, либо ограничивались общими указаниями, не выходящими на конкретное решение инженерных задач. Успешность попыток многих инженеров решить эту задачу, а также ряд допущенных экономических ошибок привели некоторых авторов к выводу о нецелесообразности поисков экономических решений [Л. 1], к выводу, что чисто технические решения (например, выбор сечения электропроводов по нагреву) близки к экономическим [Л. 2].

Данные, приведенные в таблице, показывают, что в зависимости от положенного в основу критерия экономической плотности тока будет резко отличаться от плотности, выходящей по нагреву проводов². Очевидно, если бы вычисления проводов и кабелей, диаметра деривационных трубопроводов и т. п. определялись однозначными техническими решениями, то не было бы и самой проблемы. Называемое «техническое» решение технико-экономической задачи сводится, как правило, к выбору варианта или к выводу на основе минимума капиталовложений, т. е. к определенному, но далекому от правильного экономического критерию.

Чтобы выявить экономическую сущность проблемы и решить задачу выбора параметров для электриков, гидротехников и др., приведем общую формулу технико-экономического расчета параметров. Обозначим единовременные капитальные затраты

$$K = e\Pi + r,$$

где r — годовые издержки

$$I = p_{ам} (e\Pi + r) + \frac{g}{\Pi^i} + \zeta,$$

где Π — интересующий нас параметр (сечение проводов, диаметр трубопроводов и т. п.);

$p_{ам}$ — процент амортизационных отчислений;

i, q — постоянные.

Подставим уравнение суммарных затрат:

$$F(\Pi) = pK + I = (p + p_{ам})(e\Pi + r) + \frac{g}{\Pi^i} + \zeta, \quad (1)$$

где ζ — отчисления от капиталовложений.

Задача выбора параметра сводится к нахождению минимума выражения (1) путем приравнивания нулю первой производной:

$$F'(\Pi) = e(p + p_{ам}) - \frac{ig}{\Pi^{i+1}} = 0,$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \Pi &= \sqrt[i+1]{\frac{ig}{e(p_{ам} + p)}} = \sqrt[i+1]{\frac{ig}{e}} \cdot \sqrt[i+1]{\frac{1}{p_{ам} + p}} = \\ &= A \sqrt[i+1]{\frac{1}{p_{ам} + p}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Формула (2) позволяет отделить «технический» показатель проекта, выраженный коэффициентом A , от «экономического» показателя $\sqrt[i+1]{\frac{1}{p_{ам} + p}}$. При $p = 0$ получим формулу минимума годовых издержек

$$\Pi = A \sqrt[i+1]{\frac{1}{p_{ам}}}. \quad (3)$$

При $p > 0$ получим так называемую формулу Шухова-Кельвина.

Формулы (2) и (3) исходят из правильной предпосылки о двойственном характере экономического эффекта от увеличения параметра. Эта двойственность заключается: 1) в возрастании единовременных затрат и 2) в снижении ежегодных затрат (потерь).

Формула минимума годовых издержек (3), учитывающая лишь ежегодные издержки, дает высший предел величины параметра (сечения электропровода, диаметра трубопровода и т. п.). Напротив, формула Шухова-Кельвина (2) при заданной величине p дает низшее предельное экономическое значение. Между предельными значениями простирается огромный диапазон возможных величин параметров. Так, при средних значениях показателей плотности тока, выбранная по минимуму издержек, в 1,4...1,8 раза меньше плотности тока, подсчитанной по формуле Шухова-Кельвина. Для сооружений с низким процентом амортизации и высоким процентом на капитал различие в значениях параметров, выбранных на основе двух указанных принципов, еще больше.

Оба описанных принципа не отвечают требованиям социалистической экономики. Принцип минимума издержек совершенно не учитывает значения единовременных капиталовложений. Допускается огромное увеличение затрат материалов и труда в эксплуатации. Принцип Шухова-Кельвина исходит из начисления средней прибыли на капитал. Но, как известно, в социалистическом хозяйстве нет закона средней нормы прибыли регулирующего перераспределение капитала и ценообразование. Начисление процентов на капитал, как способ оценки величины накоплений, искажает экономическую сущность социалистического воспроизводства. Это подтверждается и отсутствием определенного количественного измерителя для величины процента на капитал в советском хозяйстве. Поэтому ни

¹ Электричество, № 1, 1939; № 8 и 9, 1940; № 6, 1946; № 11, 1950; Гидротехническое строительство, № 6, 1936; № 1—2, 1945; Экономика, № 10, 1948; № 6, 1949.

² Данные таблицы заимствованы из [Л. 2] и дополнены нашими данными.

Стоимость передачи одного амперкилометра в год при различной плотности тока

[Сечения провода, мм ²]	3×10	3×16	3×25	3×35	3×50	3×70	3×95	3×120	3×150
Допускаемая плотность тока по нагреву j_1 , а/мм ²	5,5	4,4	3,8	3,2	2,9	2,6	2,3	2,1	1,9
Стоимость передачи одного амперкилометра в год:									
C'_s при экономической плотности тока $j_s = 2$ а/мм ² (12% на капитал), руб.	127	112	99	93	85	80	76	74	72
Стоимость передачи одного амперкилометра в год C''_s при экономической плотности тока $j_s = 1,24$ а/мм ² (минимум издержек), руб.	51	44,2	40,1	38,5	36,1	34,6	33,6	32,8	32,4
C_1 при $j = j_1$, руб.	159	131	111	99	89	82	76	74	72
$\frac{C_1 \cdot 100}{C'_s} \%$	125	117	112	106	105	102	100	100	100
$\frac{C_1 \cdot 100}{C''_s} \%$	312	297	277	257	247	237	226	226	222

игнорирование единовременных вложений, ни рассмотрение их, как источника накопления, неприемлемы для социалистической экономики.

Задача, которую мы ставим перед собой, заключается в отыскании правильного соотношения между реальными единовременными и ежегодными затратами при изменении параметра. Прежде всего отметим неполноту учета ежегодных издержек (I) и капиталовложений (K) в применяемых формулах (2) и (3). Известно, что издержки производства энергии охватывают не все затраты овеществленного и живого труда. «...капиталистические издержки производства товара количественно отличны от его стоимости, или действительных издержек его производства; они меньше, чем товарная стоимость...»³.

При определении критерия экономического выбора параметров необходимо помнить известное высказывание товарища Сталина: «Без систематического роста производительности труда как в области промышленности, так и в области сельского хозяйства мы не можем разрешить задач реконструкции, не можем не только догнать и перегнать передовые капиталистические страны, но даже отстаивать свое самостоятельное существование. Поэтому проблема роста производительности труда имеет для нас первостепенное значение»⁴.

Условие экономической эффективности изменения параметров можно формулировать, как повышение производительности труда или снижение общих затрат овеществленного и живого труда на единицу продукции. Сама экономическая эффективность в социалистическом хозяйстве имеет подчиненное значение, поскольку «политика не может не иметь первенства над экономикой» (Ленин). Следует учитывать также влияние на выбор параметров экономических факторов, которые не могут быть сведены к стоимостным показателям.

Ниже в практической схеме расчетов по выбору параметров мы предлагаем для получения расчетных затрат прибавлять к величине издержек дополнительную величину зарплат, имея в виду, таким образом, приблизительно учесть все затраты труда. Сознвая практическую неточность такого учета, мы все же совершаем при этом меньшую ошибку, чем при учете затраченного живого труда только в виде издержек на зарплату.

Сказанное о неполноте учета затрат труда в категории годовых издержек в той же мере относится и к капиталовложениям. Обычные сметные данные о капитальных затратах не полностью учитывают все затраты труда произведенные за срок строительства линии электропере-

дачи, кабеля, деривационного трубопровода и т.д. В предлагаемых ниже расчетных формулах капитальные затраты увеличены примерно на долю зарплат в капитальных затратах.

Однако варианты технических решений и параметры отличаются не только по стоимости, но и по размерам основных и оборотных капитальных фондов. Поэтому для уточнения величины издержек и капиталовложений формула экономического расчета должна включать такой показатель, учитывающий срок, в течение которого сумма расчетных затрат сопоставляется с единовременными капиталовложениями. В качестве такого срока мы предлагаем учитывать средневзвешенный срок амортизации основных фондов в народном хозяйстве или средний простого воспроизводства T , представляющий собой отношение общественных капитальных фондов к их годичному износу.

При увеличении параметра (сечения провода, длины трубопровода и т. п.) экономия расчетных издержек и срок простого воспроизводства должна быть не менее дополнительных капитальных затрат. За пределами T вариант повышенного параметра приведет к полной стоимости продукции без новых капиталовложений.

Величина T может быть принята по статистическим данным порядка 15 лет. Таким образом, предлагаемая расчетная формула исходит из следующего общего выражения затрат:

$$F(I) = \frac{\Sigma K}{T} + a;$$

здесь T — средний срок амортизации основных фондов, равный 15 годам; a — расчетные затраты, $a = I(1 + \omega)$, где ω — удельный вес зарплат в издержках $\Sigma K = K(1 + \Delta)$, где Δ — удельный вес зарплат в капиталовложениях.

По аналогии с формулой (2) получим:

$$I = \sqrt{\frac{(1+i) \cdot \frac{ig(1+\omega)}{e \left(p_{ам} + \frac{1+\Delta}{T} \right)}}{e \left(p_{ам} + \frac{1+\Delta}{T} \right)}}.$$

Расчет сечения электропроводов. Рассмотрим изменение формул (2), (3) и (5) к экономическому расчету сечения электропроводов.

³ Маркс, Капитал, т. III, стр. 28, Госполитиздат, 1949.

⁴ Сталин, Соч., т. 12, стр. 329.

⁵ Строго говоря, ΣK включает и оборотные фонды (без амортизации). Пренебрегая ими, мы увеличиваем величину параметра на 1–2%.

ведем наши формулы в соответствие с обозначениями, принятыми в литературе: $P = S = \frac{I^2}{j}$ — сечение

и;

$$= \frac{3I_{\max}^2 \rho \tau \beta}{1000}; e = nl; r = ml; i = 1; g = 0;$$

I_{\max} — расчетный ток;

ρ — удельное сопротивление;

τ — число часов потерь;

β — себестоимость энергии;

γf — капитальные затраты на единицу длины провода;

γ — удельный вес провода;

f — капитальные затраты на единицу веса;

m — независимая от сечения часть затрат.

В этих обозначениях различные расчетные формулы определения сечения проводов примут следующий

формула минимума годовых издержек:

$$I_{\max} \sqrt{\frac{\rho \tau \beta}{1000 \gamma f}} \cdot \sqrt{\frac{100}{P_{ам}}}; \quad (3')$$

формула Шухова-Кельвина

$$I_{\max} \sqrt{\frac{\rho \tau \beta}{1000 \gamma f}} \cdot \sqrt{\frac{100}{P_{ам} + p}}; \quad (2')$$

формула автора

$$I_{\max} \sqrt{\frac{\rho \tau \beta}{1000 \gamma f}} \cdot \sqrt{\frac{(1 + \omega) 100}{P_{ам} + \frac{1 + \Delta}{T}}}. \quad (5')$$

Ведя здесь чисто методические, а не практические цели, зададимся конкретными значениями ρ , приведенными в статье А. А. Глазунова [Л.3]:

ρ (медь), $\rho = 18,8 \frac{\Omega}{\text{км/мм}^2}$, $p = 6 \dots 12\%$, $P_{ам} =$

$= 4 \text{ руб/кг}$; при $\tau = 3400 \text{ ч}$; $\beta = 0,078 \text{ руб/квт.ч}$.

В выражении β принято выражение: $\beta = 0,028 +$

руб/квт.ч . Исходя из отчетных данных о структуре

и капиталовложений по электростанциям, при $\Delta = 0,2$.

Важно также отметить необходимость учета не только потерь энергии (Δ) и связанной с ними постоянных годовых издержек, но и потерь мощности $N =$

соответствующих им единовременных затрат.

В капиталовложениях, соответствующие теряемой

мощности $K_N = 1200 \text{ руб/квт}$. Тогда конкретные выражения допустимой плотности тока будут таковы:

Без учета потерь мощности	С учетом потерь мощности
$10,63 \sqrt{\frac{1}{\tau \beta}}$	$10,63 \sqrt{\frac{1}{\tau \beta + 0,06 K_N}}$
$15,1 \sqrt{\frac{1}{\tau \beta}}$	$15,1 \sqrt{\frac{1}{\tau \beta + 0,12 K_N}}$
$18,5 \sqrt{\frac{1}{\tau \beta}}$	$18,5 \sqrt{\frac{1}{\tau \beta + 0,18 K_N}}$
$43,5 \sqrt{\frac{P_{ам} + \frac{1 + \Delta}{T}}{\tau \beta (1 + \omega)}}$	$43,5 \sqrt{\frac{P_{ам} + \frac{1 + \Delta}{T}}{\tau \beta (1 + \omega) + \frac{K_N}{T}}}$

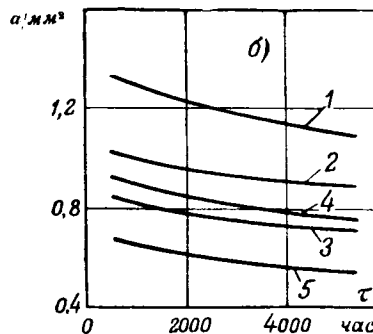
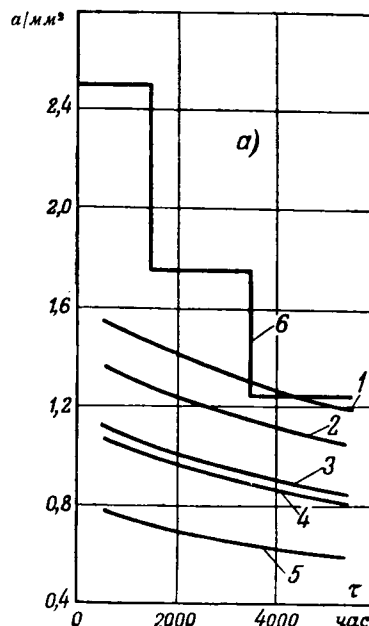


Рис. 1. Экономические плотности тока для медных проводов при различных экономических предположениях.

а — без учета потерь мощности; б — с учетом потерь мощности; 1 — по формуле Глазунова; 2 — по формуле Шухова-Кельвина при 12% на капитал; 3 — по формуле Шухова-Кельвина при 6% на капитал; 4 — по формуле автора; 5 — по формуле минимума издержек; 6 — по Правилам устройства электротехнических установок.

Формула, предложенная С. А. Кукель-Краевским, по существу не отличается от формулы Шухова-Кельвина. Предложение А. А. Глазунова сводится к применению формулы минимума издержек с коэффициентом $\alpha = 0,5$.

На рис. 1 дано сопоставление плотностей тока, подсчитанных по различным формулам. Это сопоставление показывает, что рекомендуемые Правилами устройства электротехнических установок значения плотности тока приводят к огромным потерям энергии (топлива и мощности). Формула А. А. Глазунова также дает завышенную плотность тока по сравнению даже с формулой Шухова-Кельвина. Предложенные нами значения плотности тока⁶, как и следовало ожидать, занимают промежуточное положение между формулами (2) и (3).

Преимущество предложенной формулы (5) по сравнению с формулами (2) и (3) заключается также и в учете влияния различного удельного веса зарплаты в себестоимости энергии по различным районам (рис. 2).

⁶ Следует еще раз подчеркнуть, что для применения наших формул к расчетам необходимо уточнить абсолютные значения показателей и учесть стоимостные данные в ценах 1950 г. Наши примеры имеют лишь методологическое значение для сравнения различных методов экономического расчета.

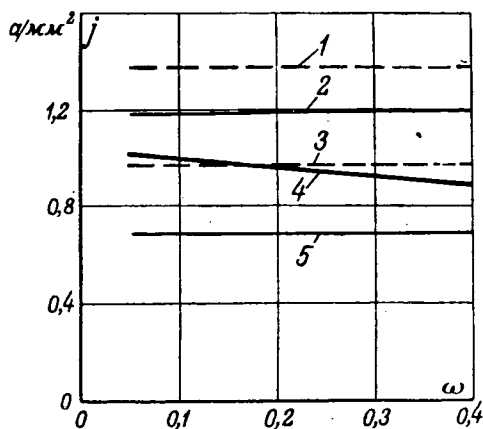


Рис. 2. Экономическая плотность тока в зависимости от доли зарплат (ω) в себестоимости энергии.

1 — по формуле Глазунова; 2 — по формуле Шухова-Кельвина при 12% на капитал; 3 — по формуле Шухова-Кельвина при 6% на капитал; 4 — по формуле втора; 5 — по формуле минимума годовых издержек.

На рис. 3 показана необходимость учета при выборе сечения проводов переменной стоимости электроэнергии в энергосистемах. Если принять за 100% допустимую плотность тока в Московской энергосистеме, то для системы Донбасса она составит 112%, для Урала 114%, а для районов с преобладанием гидроэлектростанций 173%.

Нормы плотности тока в электросетях, так же как и параметры других энергетических сооружений, деривационных каналов и пр., должны быть дифференцированы в зависимости от себестоимости топлива, структуры капиталовложений и издержек и др.

Литература

1. М. Ю. Шухатович. Выступление в дискуссии по статьям о проблеме расхода металла и снижения

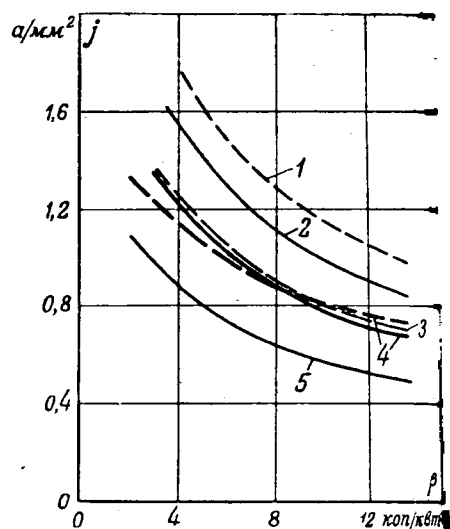


Рис. 3. Влияние учета переменной себестоимости энергии на экономическую плотность тока.

1 — по формуле Глазунова; 2 — по формуле Шухова-Кельвина при 12% на капитал; 3 — по формуле Шухова-Кельвина при 6% на капитал; 4 — по формуле втора при резком удельном весе зарплат; 5 — по формуле минимума годовых издержек.

потерь электроэнергии в электрохозяйстве СССР. Электричество, № 1, 1947.

2. Д. С. Лившиц. Об экономической плотности и потерях электроэнергии в сетях промышленных предприятий. Электричество, № 11, 1950.

3. А. А. Глазунов. Определение сечений проводов воздушных линий и жил кабелей. Электричество, № 11, 1947.

4. С. А. Кукель-Краевский. Обобщенный метод выбора оптимальных параметров энергетических новок. Электричество, № 8, 1940.



К ЧИТАТЕЛЯМ

В соответствии с решениями читательских конференций журнала «Электричество», проведенных в 1948 и 1949 гг., редакционная коллегия журнала принимала меры, направленные к улучшению содержания журнала, в частности: к увеличению числа статей на современные актуальные темы, удовлетворяющие практические запросы читателей; к развитию дискуссий, обмена опытом, технической информации; к освещению истории электротехники и пр.

Учитывая пожелания читателей, в тематический план журнала включены статьи обзорного характера, позволяющие знакомиться с состоянием отдельных вопросов читателям, не являющимся специалистами в данной области. Ряд таких статей уже был опубликован.

Для устранения еще неизжитых недостатков в журнале, а также для уточнения тематики на II полугодие 1952 г. и на 1953 г., с целью более полного освещения вопросов, особо интересующих широкие круги читателей журнала «Электричество», редакционная коллегия обращается к читателям с просьбой сообщить редакции свои замечания и соображения по содержанию журнала за последние 2—3 года, а равно соответствующие предложения и рекомендации.

Отчет об откликах читателей будет опубликован в журнале.

Редколлегия журнала «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО».



О КНИГЕ „ГРОЗОЗАЩИТА ПРОМЫШЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ И ЗДАНИЙ“¹

ага имеет ряд ошибок в гл. III «Классификация и сооружений по категориям грозозащитных меро-
в».

к, в характеристике зданий и сооружений I катего-
азано: «длительно сохраняются или систематически
ают смеси газов, паров и пыли с воздухом, способ-
орваться от электрической искры». Подобное поло-
огда в воздухе рабочего помещения образуются
опасные концентрации, допущено быть не может.
ленные «Санитарными нормами проектирования
ленных предприятий 1951 г.» «предельные концен-
» в воздухе горючих газов, паров легко воспламе-
жя и горючих жидкостей и пыли исключают такую
ность, и концентрация, допускаемая, например для
а, в 457 раз меньше взрывоопасных концентраций.
несение легковоспламеняющихся и горючих жидко-
той или иной категории произведено без учета
туры их вспышки. Так, к I категории наравне
ами, например серным эфиром, имеющим темпера-
вспышки — 41°, и сероуглеродом — 26°, отнесен
ра, имеющий температуру вспышки 29°, в то время
II категории отнесены такие легковоспламеняю-
жидкости, как бензин (авиационный), имеющий
туру вспышки — 58°, и бензол — 15°. Ясно, что
произошла досадная описка. В то же время ко II
относятся горючие газы, как, например, ацетилен
водород (имеющие нижний предел взрыва 3,5 и 4,3%

к объему воздуха), которые должны быть отнесены к I
категории, так как в соответствии с «Противопожарными
нормами строительного проектирования промышленных
предприятий и населенных мест 1951 г.» к группе А по
пожарной опасности относятся «производства, связанные
с применением жидкостей с температурой вспышки паров
28° и ниже; горючих газов, нижний предел взрываемости
которых менее 10% к объему воздуха, при применении
этих газов и жидкостей в количествах, которые могут
образовать с воздухом взрывоопасные смеси».

Ко II категории, неизвестно почему, отнесены такие
вещества, как мука комбикормовая, сахар, сера, шеллак,
пробка, которые практически не создают с воздухом взрыво-
опасные смеси, в то время как такие вещества, как
алюминиевая пудра, каменноугольная и бурого угольная пыль,
не нашли своего отражения в перечне II категории.

Хранилища взрывчатых веществ и горючих жидко-
стей в металлической укупорке небольших размеров (храни-
лища снарядов, патронов и т. д.) необходимо отнести
ко II категории.

В гл. IV «Меры защиты сооружений I категории» ни-
чего не сказано о требованиях, предъявляемых к распо-
ложению подземных элементов (заземлителей), в то вре-
мя как в отношении сооружений III категории об этом
сказано следующее: «Для этих сооружений защита от
прямых ударов молнии осуществляется точно так же, как
и для сооружений I категории, т. е. при помощи мол-
ниеотводов, изолированных от сооружения, и подземные
элементы которых (заземлители) удалены от частей зда-
ния не менее чем на 10 м».

Инж. Д. П. ЛАВРОВ

¹ С. Стекольников, В. С. Комельков, А. Ф. Бо-
ро, Ф. А. Лихачев, В. Н. Борисов, Л. М. Лопши-
иной проф. И. С. Стекольников. Изд. Академии
СР, 1951.

К ЗАМЕТКЕ Д. П. ЛАВРОВА

отдельные главы книги «Грозозащита про-
м. сооружений и зданий», Д. П. Лавров целиком
положения противопожарной и санитарной тех-
условия противогрозовой защиты сооружений. При
е обращается внимания на специфику вопросов

жидкостях, «Санитарных норм проектирования» (на которые
Д. П. Лавров), в примечании I (приложение 3)
что: «приведенные в таблице нормы concentra-
дных паров, газов и пыли являются обязатель-
шь для рабочих мест». Однако в сооруже-
занных с применением взрывчатых веществ в от-
помещениях, не предназначенных для постоянно-
вания в них рабочих, могут находиться взрыва-
концентрации газов, паров и пыли, для которых
а особо надежная защита от образования искр,
ших за счет вторичных воздействий молнии.
ны книги считали главным при разработке клас-
и противогрозовой защиты учитывать именно та-
воопасные концентрации; наличие же хотя бы
помещений с взрывоопасными концентрациями
применения соответствующей противогрозовой
защиты для всего сооружения в целом. Кроме того,
ини к § 2 большинство веществ, перечисленных
горючих, не образуют вообще с воздухом взрыва-
вещей, но легко взрываются сами при появле-
вблизи них.

Д. П. Лавров утверждает, что «отнесение легковоспла-
меняющихся и горючих жидкостей к той или иной кате-
гории произведено без учета температуры их вспышки».

Здесь автор опять не учел специфику грозовых раз-
рядов и связанных с ними явлений и механически пере-
нес условия загорания веществ от длительно действующе-
го очага пламени к кратковременной искре, возникающей
при разряде молнии. Так, в «Противопожарных нормах
1951 г.» характеристика возгораемости материалов дана
в следующем определении: «Несгораемые: под воздействием
огня и высокой температуры не воспламеняются, не тлеют
и не обугливаются». «Сгораемые: под воздействием огня
и высокой температуры воспламеняются или тлеют и про-
должают гореть или тлеть после удаления источника огня»,
где ясно понимается длительно существующий очаг огня.
В противоположность этому искровой разряд может длить-
ся миллионные доли секунды, и хотя его температура зна-
чительна, время его действия столь мало, что далеко не
во всех случаях может вызвать устойчивый очаг горения
даже для веществ, имеющих низкую температуру вспыш-
ки (см. стр. 17 книги). Для перечисленных в классифи-
кации веществ сделана попытка учесть эти специфиче-
ские качества разряда.

Обращает на себя внимание следующее противоречие
в замечаниях по книге.

Ссылаясь на санитарные нормы, Д. П. Лавров указы-
вает, что для бензина допустимая концентрация в 457 раз

меньше взрывоопасной концентрации, т. е. опасности взрыва паров бензина согласно автору, видимо, быть не может. С другой стороны, на основании противопожарных норм он требует перенести бензин из II категории в I, для которой необходимо особо строгое выполнение противогрозовой защиты. При этом остается неясным, как же классифицировать, по мнению автора, бензин и бензол? Утверждение Д. П. Лаврова о том, что мука комбикормовая, сахар и пр. не могут создавать с воздухом взрывоопасных смесей, не соответствует действительности. Достаточно указать на взрывы от статических зарядов на электродных пунктах и сахарных заводах, чтобы доказать возможность образования таких смесей. Что касается отсутствия во II категории таких веществ, как алюминиевая пудра, каменноугольная и буроугольная пыль, то приведенный в этой категории перечень веществ не является исчерпывающим и в дальнейшем будет дополняться в зависимости от исследований и эксплуатационного опыта. В этой части замечание Д. П. Лаврова будет учтено при следующем издании книги.

Требование Д. П. Лаврова о переводе взрывчатых веществ в металлической упаковке размеров (хранилища снарядов, патронов) из III в II как обладающих «меньшей надежностью», во II, считать необоснованным. Зоны защиты от прямых молний для всех зданий и сооружений вне зависимости от категорий рассчитываются одинаково, поэтому разделение на большую или «меньшую надежность» не имеет смысла. Основное отличие в защите сооружений II и III категорий заключается в том, что сооружения III категории требуют мер защиты от вторичных воздействий молнии. Ввиду того, что в хранилищах снарядов взрывчатых веществ находятся в герметически закрытой упаковке, кающиеся за счет вторичных проявлений молнии могут непосредственно воздействовать на взрывчатые вещества и, таким образом, опасность взрыва не исключается. Что касается возможности взрыва таких объектов при пожаре, то такая опасность от молнии исключается при выполнении мер III категории.

Инж. В. Н. Б.

К СТАТЬЕ „ВОПРОСЫ НОРМИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ И РАЗРЯДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, АППАРАТОВ И ИЗОЛЯТОРОВ“

(*Электричество* № 6, 1951)

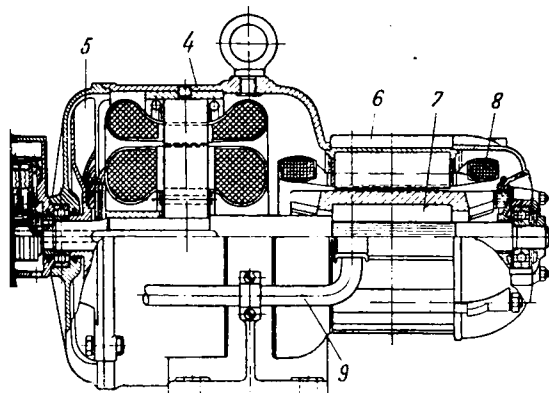
По сообщению Всесоюзного электротехнического института им. Ленина в статье А. Н. Шеренциса «Вопросы нормирования испытательных и разрядных напряжений высоковольтных трансформаторов, аппаратов и изоляторов» автором были приведены таблицы из неопубликованной

устаревшей промежуточной редакции проекта стандарта на испытательные и разрядные напряжения от 1949 г., в то время как в сентябре 1950 г. ВЭИ издал новую редакцию стандарта.



ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ТОКА И-88

Заводы выпускают в большом количестве электрифицированный инструмент с электродвигателями, работающими при частоте 200 гц. Для их питания от электрических сетей 50 гц завод «Электростроитель» Министерства лесного и дорожного машиностроения приступил к выпуску преобразователей типа И-88, которые трансформируют трехфазный ток 50 гц при напряжении 220 или 380 в в трехфазный ток с частотой 200 гц при напряжении 220 в.



1 — коллектор; 2 — коллектор; 3 — щетка; 4 — корпус генератора; 5 — вентилятор; 6 — корпус двигателя; 7 — ротор; 8 — обмотка статора; 9 — кабель.

Обычно такое преобразование показано на рис. 1, который состоит из помещенных на одном валу двухполюсного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором АЛ-32 и шестиполюсного асинхронного генератора с фазным ротором. Технические данные преобразователя следующие: потребляемая мощность — 1,5 квт; отдаваемая — 1,5 квт; режим работы — непрерывный; $\cos \varphi$ электродвигателя — 0,7 и агрегата — 0,8; размеры — 300×300×550 мм, вес — 40 кг.

Механизация строительства, № 3, 1951. В. Н. Бармаш

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРЕЛЕВОЧНЫЙ ТРАКТОР

Ленинградский филиал Научно-исследовательского института лесной промышленности и энергетики лесозаготовок (ЦНИИМЭ) образцы трелевочных электрических тракторов. В этих тракторах произведен на базе трактора КТ-12, с которого сняты двигатель с коробкой, аккумуляторы и кабины. Вместо двигателя оставлен электродвигатель мощностью 38 квт, напряжение 1000 в. Электродвигатель предназначен только для движения трактора, но и для вращения барабана. На кабельном барабане намотан четырехжильный (4×10 мм²) кабель КЭП. Ток к электродвигателю подводится от кабеля через роторный токосъемник с контактами, находящимися на валу барабана. Управление сосредоточено в кабине водителя. Сеть работает при напряжении 12 в и для ее питания установлен трансформатор — 1000/12 в. Основные размеры электрического трелевочного трактора: длина — 1175×2000×3670 мм, а вес с кабелем 7600 кг. Трактор имеет тот недостаток, что кабельный барабан расположен перед кабиной водителя, а не сзади.

Электрические тракторы ЭТТ-1 электрической энергией питаются от передвижной трансформаторной подстанции, установленной на двухосном прицепе. На передвижной подстанции установлено два понижающих трансформатора: 75 квт для питания двух элек-

трических тракторов и 20 квт для питания электрических пил, погрузочных лебедок, небольшой ремонтной мастерской и других потребителей электрической энергии на лесозаготовках. Недостатком подстанции является большая высота, что следует учесть при дальнейшем производстве.

Для увеличения радиуса трелевки до 1,4 км применяется специальная дополнительная передвижная кабельная тележка.

Трелевочные электротракторы даже в условиях самой суровой зимы могут оставаться все время на открытом воздухе, не нуждаясь в гараже.

(Механизация трудоемких и тяжелых работ, стр. 27, № 5, 1951. В. С. Музыкин)

ДРОССЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО НАСЫЩЕНИЯ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Увеличение мощности, потребляемой автомобильным электрооборудованием, от 70 вт для автомобиля ГАЗ-А до 1000 вт для автобусов ЗИС-154 выявило ненадежность в эксплуатации существующих генераторов постоянного тока и, особенно, их вибрационных регуляторов напряжения. Это обстоятельство заставило рассмотреть вопрос о применении генераторов переменного тока с последующим выпрямлением селеновыми выпрямителями. Вследствие того, что автомобильный генератор работает с переменной скоростью вращения, должен быть предусмотрен регулятор, поддерживающий ток или напряжение генератора приблизительно постоянными, независимо от скорости вращения. В качестве такого регулятора авторы статьи предлагают использовать схему с дросселем насыщения. Схема регулирования по току, испытанная авторами, дана на рис. 1. Обмотка переменного тока дросселя включена последовательно

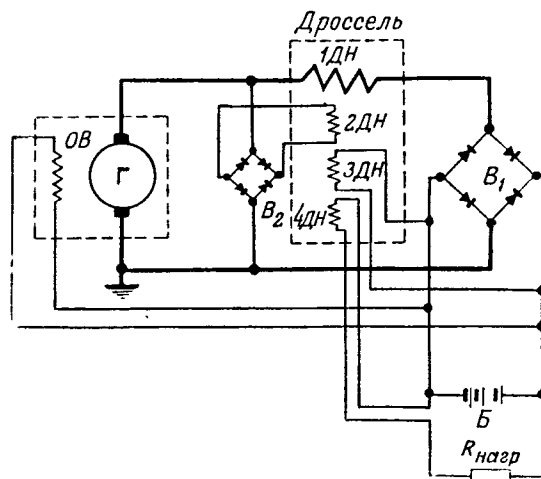


Рис. 1. Принципиальная схема электрооборудования автомобиля на переменном токе (регулирование по току).

с нагрузкой. Дроссель имеет три обмотки управления: 2ДН — обмотку связи по напряжению генератора, 3ДН — обмотку связи по напряжению батареи, 4ДН — обмотку связи по току нагрузки. Зависимости напряжения генератора, напряжения батареи и зарядного тока от скорости вращения, полученные в результате опытов, приведены на рис. 2.

Основной недостаток рассматриваемой схемы тот, что зарядка батареи идет при постоянной величине тока. Однако в статье отмечается ее удобство в случае генератора с постоянными магнитами. Возможно также регулирование по напряжению или комбинированное — по напряжению и току. В статье приведены две схемы такого рода. В них ос-

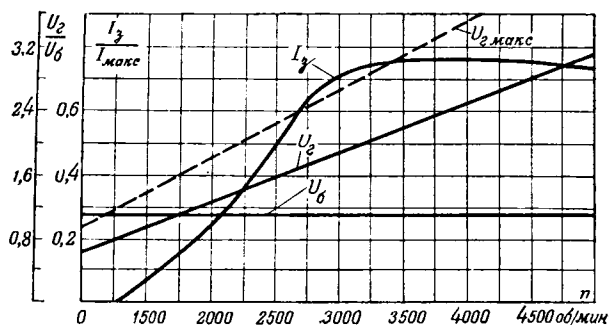


Рис. 2. Зависимость зарядного тока, напряжения батареи и напряжения генератора от числа его оборотов.

I_2 — ток генератора; I_3 — зарядный ток; U_0 — напряжение батареи; U_2 — напряжение генератора.

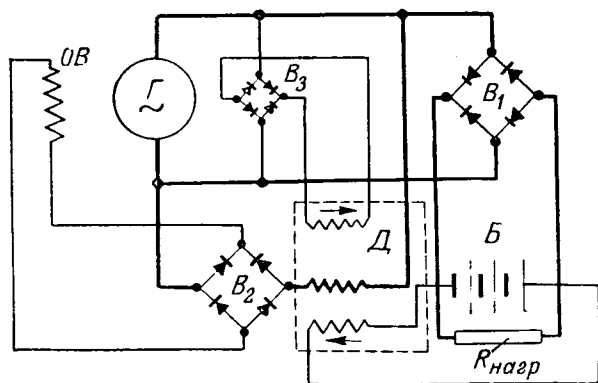


Рис. 3. Принципиальная схема регулирования по напряжению.

новная обмотка дросселя включена последовательно в цепь обмотки возбуждения генератора. Дроссель имеет две (рис. 3) обмотки управления — по напряжению генератора и по напряжению батареи. Потоки этих обмоток направлены встречно. В схеме комбинированного регулирования по току и напряжению добавляется третья обмотка связи по току нагрузки (включая ток батареи). Потоки обмоток связи по току и напряжению нагрузки направлены одинаково и навстречу потоку обмотки связи по напряжению генератора.

На основании проделанных опытов авторы статьи делают вывод о возможности питания автомобильного электрооборудования от бесколлекторного генератора переменного тока с бесконтактным регулятором.

(Автомобильная и тракторная промышленность, № 6, 1951. А. С. Белонковский и Г. П. Смирнов)

ИНДУКЦИОННЫЙ РАЗОГРЕВ БИТУМА

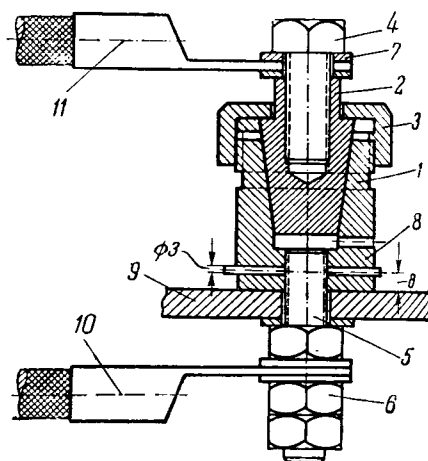
Для различных работ в строительной промышленности в качестве вяжущего материала применяется битум. Для разогрева его можно с успехом использовать тепло вихревых токов. На строительстве одной электрической станции построены и успешно эксплуатируются около года две опытные индукционные печи, имеющие кубическую форму, со стороной корпуса в 1 м и сваренные из листовой стали толщиной 10 мм. Корпус играет роль сердечника индукционной печи. Снаружи корпус покрыт листовым асбестом в один слой для удобства намотки провода ПГ-50, сечением 28 мм². Провод намотан в один ряд на высоту 0,8 м от основания. При 60 витках обмотки, напряжении сети 210 в, токе 110 а и $\cos \varphi = 0,5$ расход электрической энергии на один разогрев составляет 10,55 кВтч. Установка может лавать ежедневно до 2 т битума с температурой 180...200°.

Опыт работы установок показал, что индукционный способ разогрева битума не имеет недостатков, кроме для других методов подогрева (битумные печи-временки, костры, электроподогрев), и не требует большого расхода электрической энергии.

(Механизация трудоемких и тяжелых работ, № 10, 1951. С. В. Климовский)

ШТЕПСЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СВАРОЧНОГО ПРОВОДА

В условиях производства весьма часто концы сварочных проводов соединяются между собой простым скручиванием. В целях рационализации соединения проводов, передающих большие токи, Брянским строительным заводом было разработано для своего штепсельное соединение сварочных проводов, исключающее применение скруток с присущими им недостатками.



Конструкция такого штепсельного соединения ясна из рисунка. Здесь 1 — латунное гнездо; 2 — штифтовый штифт; 3 — накидная гайка; 4 и 5 — болты; 6 — гайки зажимов; 7 — кабельные наконечники; 8 — порная шпилька; 9 — текстолитовая плита (ставится в крепление штепсельного соединения на распределительной щитке); 10 — подводящий провод; 11 — провод к тродам.

(Автогенное дело, № 6, 1951. Л. И. Благодатский)

ЗА РУБЕЖОМ

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОКА МОЛНИИ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В течение ряда лет в Германии на линиях электропередачи 15...220 кв производились многочисленные измерения токов молнии ферромагнитными регистраторами. Всего было установлено 115 тыс. регистраторов, с помощью которых было учтено 1434 прямых ударов. Длина линий электропередачи, на которых производились измерения, равнялась 2000 км. Все результаты измерений классифицировались по номинальным напряжениям и делились на случаи переходящих замыканий и замыканий, имевших те или иные последствия.

Из общего числа зарегистрированных прямых ударов, вызвавших замыкания на линии электропередачи, 71% носили переходящий характер. На линиях, защищенных по всей длине, процент самоустранившихся замыканий увеличивается до 81%, а для линий 220 кв достигает 90%. Все остальные зарегистрированные случаи замыканий имели устойчивый характер. Необходимо отметить, что рассматриваемые линии электропередачи в соответствии с немецкой практикой эксплуатировались в сетях с изоляцией, заземленной через дугогасящие катушки, что объясняется высоким процентом самоустранившихся замыканий.

С уменьшением номинального напряжения электропередачи и соответственным уменьшением прочности линейной изоляции увеличивается процент устойчивых замы-

При измерениях подразделялось количество ударов в и пролеты линии электропередачи. Было установлено на линиях, защищенных тросом, число прямых в в опоры заметно меньше, чем в пролеты. Так, например, при одном тросе 66% общего количества разрядов идет пролет линии электропередачи, при двух тросах в разрядов в пролете увеличивается до 79, а при тросах — даже до 91%. В то же время на линиях, защищенных тросом по всей длине, только 47% общего количества ударов молнии поражают провода линии электропередачи.

Зарегистрированные случаи замыканий в результате ударов молнии на линиях с тросом объясняются преимущественно обратными разрядами. Наблюдениями, что на линиях, защищенных одним тросом, из общего числа замыканий, вызвавших работу релейной защиты, обусловлены обратными разрядами. На линиях с тремя тросами все замыкания вызваны исключительно обратными разрядами, так как на этих линиях в прорыва молнии не зарегистрировано. Измерения тока молнии производились при помощи клидометров на линии 60 кВ без троса. В восьми случаях на протекающих через опоры токов оказалась по 10...15 кА/мксек. В трех случаях — 16...18 кА/мксек и в двух случаях была зарегистрирована максимальная крутизна, равная 25...30 кА/мксек.

Токи молнии с максимальной крутизной, как правило, имеют очень небольшую амплитуду. Анализируя описанные выше случаи большой крутизны при малых токах молнии без троса, необходимо отметить, что не исключена возможность того, что все эти случаи могли быть вызваны перекрытием линейной изоляции. В табл. 1 приведены сводные результаты 983 измерений амплитуд молнии.

Из общего числа прямых ударов 87% имели отрицательную полярность и только 13% — положительную. Измерения также показали, что количество ударов положительной полярности заметно увеличивается с уменьшением тока. При токах до 10 кА удары положительной полярности составляли 27%. Это в два с лишним раза выше средних значений.

Нужно отметить, что чем надежнее защищена линия электропередачи тросом, тем меньше было зарегистрировано разрядов положительной полярности. Из общего количества разрядов: 77% имеют амплитуду меньше 40 кА, 70% и 97,4% меньше 100 кА. Удары молнии с силой свыше 100 кА были обнаружены всего в 25 случаях (2,6%). В 1937 г. была зарегистрирована максимальная амплитуда тока молнии положительной полярности, равная 400 кА. За первым разрядом последовал второй

Таблица 1

Зарегистрированные амплитуды токов молнии и их полярность

Ток, кА	Общее количество разрядов молнии		
	Полярность		Итого
	положительная	отрицательная	
До 10	65	172	237
10—20	24	194	218
20—30	9	177	186
30—40	6	115	121
40—50	5	84	89
50—60	5	41	46
60—70	3	22	25
70—80	2	14	16
80—90	1	13	14
90—100	—	5	5
100—110	1	8	9
110—120	—	2	2
120—130	—	4	4
130—140	1	2	3
140—150	—	3	3
150—160	—	2	2
160—170	—	—	—
170—180	1	1	2
400	1	—	1
Итого . .	124	859	983
%	13	87	100

разряд отрицательной полярности с амплитудой в 100 кА. Автор подчеркивает, что измерения были произведены надежно, и нет оснований сомневаться в полученных результатах, хотя случаи регистрации таких больших амплитуд тока молнии должны встречаться крайне редко. Остальные 24 разряда имели амплитуды тока в пределах 100...180 кА.

Затем сообщаются результаты 1275 измерений токов, протекающих через опоры. В среднем около 79% имели амплитуды в пределах до 20 кА, около 95% до 40 кА и около 99% до 60 кА. Только в одном случае был зарегистрирован ток в опоре, равный 100 кА. Максимальные токи в тросах при ударах в опоры равнялись 20...30 кА. Подавляющее количество измеренных токов в тросах, около 99%, не превосходило 70 кА. Только в одном случае был зарегистрирован ток в тросе, равный 260 кА. Следует отметить, что разряды тока молнии распределялись равномерно вдоль всей длины электропередачи. При этом не

Таблица 2

Количество зарегистрированных поражений линии электропередачи с одним тросом в зависимости от величины угла защиты

Номинальное напряжение линии электропередачи, кВ	Ниже 50			50—60			110			220			Итого		
Величина угла защиты, градусы	С	О	П	С	О	П	С	О	П	С	О	П	С	О	П
26 и меньше	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9	—	—
26—32	71	31	—	12	2	—	44	2	—	—	—	—	127	35	—
32—37	11	4	—	28	1	—	77	4	—	54	—	—	170	9	—
37—45	10	2	—	46	4	—	64	16	3	—	—	—	120	22	3
45—51	—	—	—	3	—	—	39	1	3	84	—	10	126	1	13
51—59	1	—	—	60	13	2	72	4	—	—	—	—	133	17	2
59—68	1	—	1	3	—	1	—	—	—	—	—	—	4	—	2
68—78	—	—	—	—	—	—	8	—	5	—	—	—	8	—	5
Итого . . .	103	37	1	152	20	3	304	27	11	138	—	10	697	84	25

Примечание. С — суммарное число зарегистрированных поражений линии электропередачи.

О — число обратных разрядов.

П — число прорывов молнии через тросовую защиту.

наблюдалось повторяемости ударов в каких-нибудь определенных точках.

В табл. 2 приведены данные, характеризующие количество прямых ударов в двухцепные и одноцепные линии электропередачи, защищенные одним тросом, за период 1937—1950 гг.

Из таблицы следует, что у большей части рассматриваемых линий имеются самые разнообразные защитные углы в пределах от 25° до 60°. Опыт эксплуатации показывает, что прорывы молнии через тросовую защиту наблюдаются на опорах, у которых величина защитного угла равна 37° и выше. Следует отметить, что наибольшее количество прорывов молнии через тросовую защиту зарегистрировано на линии 220 кВ с шестиугольным расположением проводов. Из общего количества ударов молнии наблюдалось 10 случаев поражения провода помимо троса. При этом поражаемость проводов, находящихся на средней траверсе, заметно выше, чем на верхней и нижней. В лучших условиях, с точки зрения грозопоражаемости, оказалась двухцепная линия электропередачи 220 кВ с вертикальным расположением проводов. На двухцепных линиях с горизонтальным расположением проводов, защищенных одним тросом, наблюдается значительное количество случаев поражений проводов.

По мнению автора, для того чтобы избежать прорывов молнии через тросовую защиту, угол должен быть не больше 33°...34°. В заключение автор указывает, что при расчете заземляющих устройств следует ориентироваться на токи через опоры в диапазоне от 40 до 60 кА.

Измерения, описанные в статье, могут служить дополнительным фактическим материалом к результатам ранее опубликованных в СССР работ ряда научно-исследовательских организаций, в которых произведено подробное исследование природы грозových разрядов и обобщен анализ опыта грозозащиты в энергосистемах Советского Союза.

Результаты работ советских ученых показали, что успехи, достигнутые в СССР в вопросах изучения природы молнии, грозозащиты и изоляции, дают возможность создания полностью грозозащитных электрических систем.

Необходимо отметить, что нет никаких оснований выбирать защитный уровень линии электропередачи, ориентируясь на уникальные случаи зарегистрированных амплитуд тока молнии, тем более, что приведенные выше данные о регистрации тока молнии с амплитудой в 400 кА пока не нашли подтверждения в практике регистраций токов молнии в СССР и за границей. Следует также указать на явную нецелесообразность иногда применяющейся в Германии системы защиты линий электропередачи при помощи трех тросов. В статье описывается ряд случаев грозových перекрываний на линиях электропередачи, вызванных прорывом молнии через тросовую защиту, вследствие больших защитных углов на опорах, защищенных одним тросом. Очевидно, что на одноцепных, а особенно на двухцепных линиях на металлических опорах с горизонтальным расположением проводов, всегда необходима повеска двух тросов и нельзя рекомендовать применение одного троса, часто встречающегося в немецкой практике. В случае защиты линии электропередачи двумя тросами очень легко создать надежный защитный угол без дополнительных затрат на увеличение веса опоры.

(ЕТЗ, № 7, стр. 191, 1951. Н. Baatz)

Инж. А. Н. ШЕРЕНЦИС

ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

(Обзор)

При тепловых испытаниях трансформаторов непосредственные измерения позволяют определить температуру верхних слоев масла и среднюю температуру обмоток после отключения трансформатора. Средняя же температура масла не поддается непосредственному измерению. Согласно американским правилам испытания трансформаторов средняя температура масла определяется как разность между температурой масла в верхних слоях и половиной перепада температур в охладителях. По существу тепловых процессов, имеющих место в трансформаторе, под средней температурой масла можно понимать ту его температуру, к которой стремится темпе-

ратура обмоток в момент отключения нагрев. Определение средней температуры масла позволяет опытным путем на основе ряда последовательных измерений сопротивления обмоток непосредственно за их отключением после установившегося режима.

Как известно, в большинстве случаев достаточно для практических целей точно, что перегрев обмотки в процессе ее охлаждения является по следующему закону:

$$\theta = \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где θ — перегрев обмотки по отношению к маслу в момент отключения; θ_0 — тоже в начале процесса охлаждения; τ — постоянная времени обмотки.

Поскольку сопротивление обмоток изменяется порционально колебаниям ее температуры, то можно написать:

$$\Delta R = R - R_e = \Delta R_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где R — сопротивление обмотки в момент t ; R_e — сопротивление обмотки в момент отключения; R_e — сопротивление обмотки в момент отключения; это сопротивление R_e соответствует средней температуре масла согласно вышеприведенному определению; ΔR_0 представляет собой разность температур в момент отключения, т. е. $\Delta R_0 = \Delta R$ при $t = 0$; $R_0 = R_e + \Delta R_0$, где R_0 — сопротивление обмотки в момент отключения.

Испытание производится следующим образом. Отключение обмоток измеряется обычным способом. Сопротивление через каждые 2—3 мин. в течение примерно равного постоянного времени данной обмотки на полугрифической бумаге наносится. $\Delta R = R - R_e$, причем значение R_e подбирают так, чтобы все точки легли на прямую. При этом эту прямую до ординат ($t = 0$), можно найти значение $R_0 = \Delta R_0 + R_e$. Определив, таким образом, методом степенного приближения R_e , находим среднюю температуру масла

$$T_{cp} = \frac{R_e - R_c}{R_c} (T_c + 234,5) + T_c,$$

где R_c — «холодное» сопротивление обмотки, измеренное при температуре T_c .

Проведенные тепловые испытания ряда однофазных и трехфазных масляных трансформаторов мощностью 75 до 500 кВА показывают, что средние температуры масла, определенные указанным способом, исходя из сопротивления обмоток высшего и низшего напряжения, несколько отличаются друг от друга. Однако средняя температура масла, полученная путем вычитания из температуры верхних слоев масла половины перепада температур в охладителях.

Измерение температуры обмоток трансформаторов как правило, производится путем измерения сопротивления обмоток на постоянном токе после отключения нагрузки. Этот метод представляет значительные неудобства и не позволяет осуществлять контроль за температурой обмоток в процессе нормальной работы трансформатора. Из числа других методов, позволяющих избежать неудобств (например, метод тепловой модели обмотки), следует указать на метод, основанный на наложении постоянного тока на переменный рабочий ток обмотки трансформатора. Измерение напряжения и силы в наложенного постоянного тока дает возможность следить за сопротивлением, а следовательно, и за температурой обмоток без нарушения нормальной работы трансформатора.

В качестве источника вспомогательного постоянного тока могут быть использованы: аккумуляторная батарея, генератор или выпрямитель, включаемые различными способами, в зависимости от схемы соединения обмоток трансформатора, сопротивление которой подлежит измерению. В случае соединения обмотки в звезду с выделенной нулевой точкой источник постоянного тока включается в цепь заземления последней; в случае же соединения обмотки трансформатора в треугольник источник

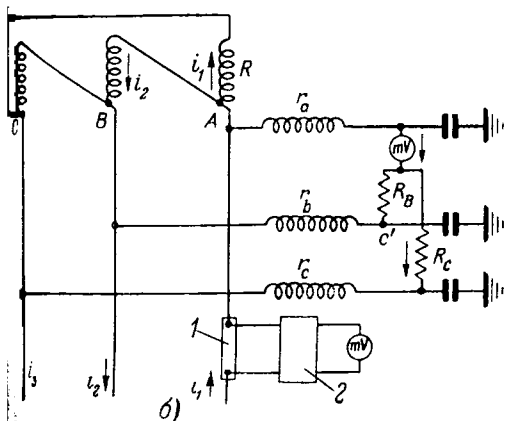
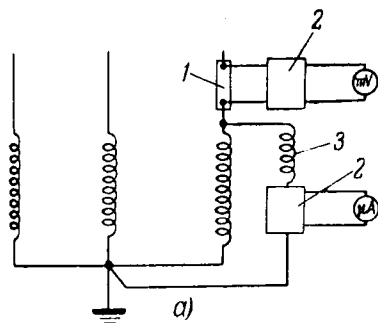


Рис. 1. Принципиальная схема для измерения сопротивления обмоток трансформаторов методом наложения постоянного тока.

Обмотка трансформатора соединена в звезду; б — обмотка трансформатора соединена в треугольник; 1 — шунт; 2 — фильтр; 3 — индуктивность (первичная обмотка трансформатора напряжения).

Включается в цепь вспомогательного трансформатора или первичной обмотки, включаемых между соответствующими клеммами испытываемого трансформатора и землей.

Измерение постоянного тока, протекающего по испытываемому трансформатору, производится с помощью милливольметра, измеряющего падение напряжения на включенном последовательно с обмоткой трансформатора. Во избежание перегрузки милливольметра током, значение которого может в десятки раз превышать значение вспомогательного постоянного тока, между шунтом и прибором включается резистор. При соответствующем выборе прибора можно добиться того, чтобы остаточное напряжение с частотой зажимов милливольметра не превышало порядка 20 мВ, не искажало результатов измерения. Величина постоянного постоянного тока выбирается порядка 100 мА в качестве прибора для измерения падения на шунте можно использовать милливольметр точности 0,5 с пределами измерения 20...100 мВ. Измерение напряжения постоянного тока производится с помощью микроамперметра (класс 0,5; предел 20 мкА), подключаемого к зажимам обмотки трансформатора через индуктивность с большим реактивным активным сопротивлением. В качестве сопротивления может быть использована первичная обмотка трансформатора напряжения. Последовательно с обмоткой включается фильтр (см. рисунок). В случае обмотка испытываемого трансформатора соединена в звезду, необходимо применение трех трансформаторов для измерения. Если для этого последнего обозначить через I_1 — постоянный ток в фазе I; I_2 — ток в фазе II; I_3 — ток в фазе III; r_a , r_b , r_c — сопротивления обмоток трех трансформаторов напряжения, измеряемых для измерения; R_B и R_C — сопротивления, включенные последовательно с микроамперметром, то сопротивление обмотки испытываемого трансформатора определяется из следующего уравнения:

$$R = \frac{I(2r_a + r_b + R_B)}{I_1}$$

По указанному методу были с удовлетворительным результатом проведены тепловые испытания трансформаторов мощностью до 100 МВА и напряжением до 220 кВ.

Литература

1. M. F. Beavers. AIEE Transactions, т. 69, ч. II, стр. 703, 1950.
2. C. Dietsch, H. Larrue, M. Régent. Bull. SFE, № 6, стр. 257, 1951.
3. J. Derippe. Bull. SFE, № 6, стр. 273, 1951.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ НАРУЖНОЙ УСТАНОВКИ

Установившийся и наиболее распространенный тип конструкции воздушных выключателей наружной установки имеет в своей токоведущей цепи последовательно соединенные контакты дугогасительных камер и контакты разъединителя.

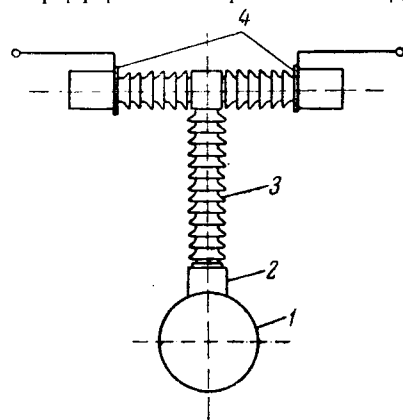
Наличие разъединителя, в особенности при напряжениях 110 кВ и выше, усложняет конструкцию выключателя и уменьшает надежность его работы, а массивный наружный нож резко повышает механические нагрузки на опорный фарфор.

В воздушных выключателях фирмы Броун-Бовери наружный разъединитель отсутствует, и функция разъединения цепи возлагается на дугогасительные контакты.

На рис. 1 показан схематический чертеж такого выключателя на номинальное напряжение 80 кВ.

Выключатель состоит из бака для сжатого воздуха, на котором установлен фарфоровый опорный изолятор,

Рис. 1. Схематический чертеж выключателя.



1 — бак выключателя; 2 — быстродействующий дутьевой клапан; 3 — опорная колонка; 4 — дугогасительная камера.

служащий одновременно трубой для подачи сжатого воздуха в дугогасительные камеры. Выход сжатого воздуха из бака в фарфоровый опорный изолятор закрыт при помощи быстродействующего дутьевого клапана.

На верхнем конце опорного изолятора смонтированы две горизонтально расположенные последовательно соединенные дугогасительные камеры.

Для размыкания выключателя открывается быстродействующий клапан и сжатый воздух из бака, через опорный изолятор, попадает в полость дугогасительных камер. Под действием сжатого воздуха подвижные дугогасительные контакты быстро отжимаются на некоторое, наиболее благоприятное для гашения дуги, расстояние от неподвижных контактов, и образующаяся при этом дуга гасится потоком сжатого воздуха, врывающимся в полость подвижного контакта. Подвижные контакты продолжают медленно передвигаться дальше, увеличивая расстояние до неподвижных контактов, пока не достигнут упора, являющегося одновременно запорным клапаном. Полный ход контактов в каждой камере равен 63 мм ($2\frac{1}{2}$ ").

В таком положении дугогасительные контакты продолжают удерживаться сжатым воздухом, заполняющим дугогасительную камеру, обеспечивая достаточную электрическую прочность образовавшегося разрыва цепи. Таким образом процесс отключения развивается на два этапа: быстрое расхождение дугогасительных контактов на рас-

стояние, благоприятствующее гашению дуги, и медленное дополнительное расхождение контактов на расстояние, обеспечивающее требуемую электрическую прочность разрыва.

Для обратного включения достаточно закрыть быстродействующий дутьевой клапан и контакты замыкаются под действием пружин. Кроме пружин подвижные контакты снабжены специальными поршнями, регулирующими скорость движения контактов.

Для других более высоких напряжений применяют последовательное соединение камер выключателя для 80 кВ, поставленных на опорный фарфор, соответствующий заданному напряжению.

С точки зрения технической и производственной преимуществ этой серии состоит в упрощении конструкции и большой унификации узлов и деталей.

При увеличении количества разрывов принимаются меры для выравнивания напряжения между ними, для чего применяются либо дополнительные конденсаторы, шунтирующие крайние разрывы, либо те же конденсаторы в сочетании с нелинейными сопротивлениями.

На рис. 2 показано распределение напряжения между 6 разрывами 220-кВ выключателя при различных способах

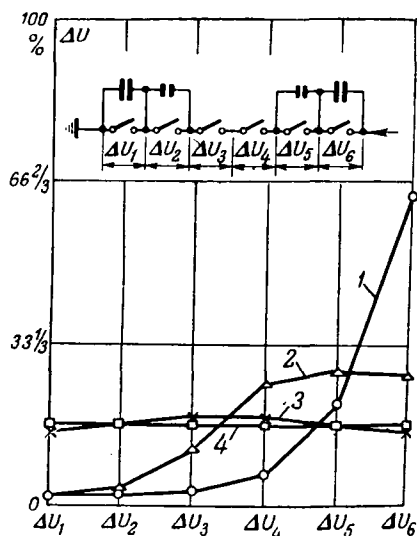


Рис. 2. Распределение напряжения между разрывами выключателя 220 кВ.

1 — без выравнивания напряжения, одна камера заземлена; 2 — частичное выравнивание напряжения емкостями, одна камера заземлена; 3 — частичное выравнивание емкостями при отсутствии заземления; 4 — выравнивание напряжения нелинейными сопротивлениями.

шунтирования. Лучшее распределение напряжения получается при наличии нелинейных шунтирующих сопротивлений.

Для снятия напряжения с этих сопротивлений последовательно с ними включаются дополнительные дугогасительные камеры, контакты которых размыкаются спустя два-три полупериода после гашения главной дуги и отключают ток, идущий через шунтирующие сопротивления.

На рис. 3 показан общий вид такого выключателя с шунтирующими емкостями, сопротивлениями и дополнительными дугогасительными камерами.

Шунтирование сопротивлениями увеличивает отключаемую мощность выключателя на 220 кВ с выравнивающими конденсаторами с 3 500 до 5 000 мвга.

Применяемые нелинейные сопротивления пропускают при номинальном напряжении ток всего в несколько миллиампер, возрастающий в десятки раз при удвоении напряжения. Благодаря такой характеристике шунтирующие сопротивления способствуют не только равномерному распределению напряжения между разрывами, но также благоприятно влияют на уменьшение перенапряжений при отключении холостых линий и трансформаторов.

При испытаниях такого выключателя в Парижской сети 220 кВ, кроме отключений токов короткого замыкания отключались также холостые линии длиной до 474 км и малые индуктивные токи от 20 до 120 а. При отключении холостых линий повторных зажиганий не отмечалось и перенапряжения во всех случаях не выходили за пределы допустимых. Выключатель также разрывал полную мощность при восстанавливаемом напряжении вдвое выше номинального (при включении на параллельную работу несинфазных сетей).

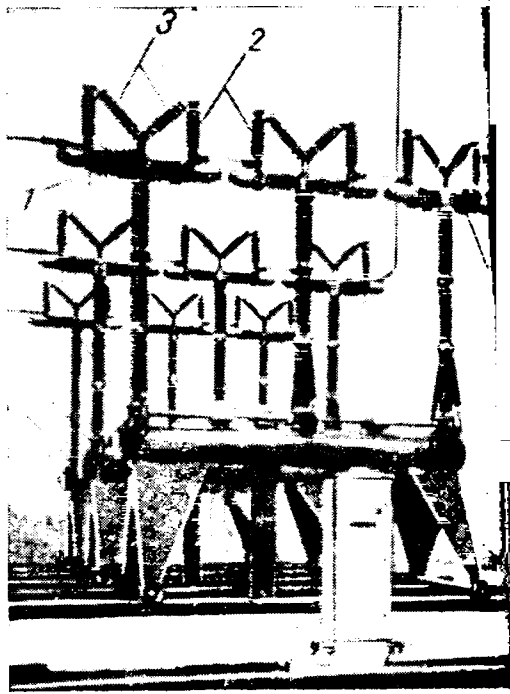


Рис. 3. Общий вид выключателя 220 кВ.

1 — шунтирующие емкости; 2 — вспомогательные контакты; 3 — шунтирующие сопротивления.

При исследовании изоляционных свойств камер, полненных сжатым воздухом, ставилась задача, чтобы механическая прочность при промышленных и импульсных перенапряжениях была выше электрической прочности.

На рис. 4 произведено сопоставление внешней и внутренней электрической прочности одной дугогасительной камеры. Из кривых видно, что камера со сжатым воздухом обеспечивает требуемую электрическую прочность.

Компрессорная установка выключателя рассчитана на давление 35 ат, которое в целях осушки воздуха

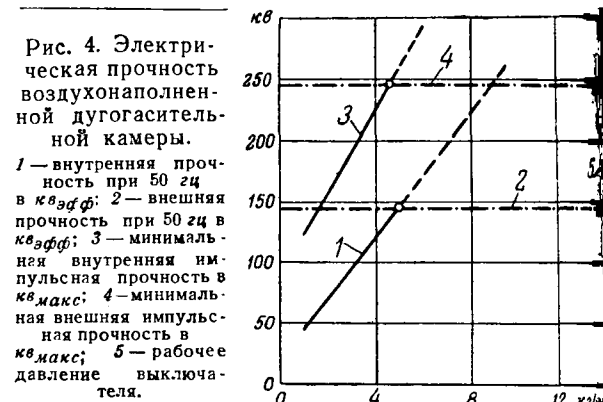


Рис. 4. Электрическая прочность воздушнонаполненной дугогасительной камеры.

1 — внутренняя прочность при 50 гД в кВэфф; 2 — внешняя прочность при 50 гД в кВэфф; 3 — минимальная внутренняя импульсная прочность в кВмакс; 4 — минимальная внешняя импульсная прочность в кВмакс; 5 — рабочее давление выключателя.

заполнением выключателя снижается приблизительно до 16 ат. Рабочее давление воздуха в баке выключателя 15 ат.

Во время испытаний одна фаза выключателя использовалась в качестве включающей на короткое замыкание, а вторая использовалась как отключающая. В перерывах на трехфазную мощность короткого замыкания выключатель отключил мощность 7 200 мвга без учета постоянной составляющей и 10 000 мвга с учетом постоянной составляющей.

После всех испытаний контакты остались в пригодном для дальнейшей работы состоянии.

Собственное время на отключение равнялось около 0,04 сек. Длительность горения дуги 0,01...0,02 сек. Таким образом, время отключения не превышает 0,06 сек. Время включения составляет около 0,14 сек.

◆ ◆ ◆

Профессор Л. А. Жекулин

К 50-летию со дня рождения

Лев Анатольевич Жекулин родился в 1901 г. В 1922 г. он поступил в Московский государственный университет. Закончив физическое отделение МГУ, Л. А. Жекулин продолжал образование в Институте народного хозяйства им. Плеханова, изучая радиотехнику под руководством акад. М. В. Шулейкина.

В 1929 г. Л. А. Жекулин окончил Институт народного хозяйства им. Плеханова и успешно защитил дипломную работу «Исследование распространения радиоволн в магнитном поле земли», выполненную им под руководством М. В. Шулейкина. Эта работа была отмечена как выдающаяся и опубликована в 1930 г. Она явилась фактически первой работой на русском языке по вопросу распространения электромагнитной волны в ионизированной среде при наличии магнитного поля земли и представляла серьезный вклад в науку. В этой работе был дан ряд практических формул, объясняющих явления распространения радиоволн в реальных условиях, при наличии земного магнитного поля.

Одновременно с научной деятельностью Л. А. Жекулин ведет и педагогическую работу — с 1929 г. в Институте им. Баумана по кафедре физики и электротехники и в Московском электротехническом институте связи по кафедре электротехники. Начав работу на кафедре электротехники Института связи рядовым преподавателем, Лев Анатольевич благодаря своим способностям и эрудиции быстро выдвигается среди членов кафедры и с 1939 г. возглавляет кафедру.

В 1936 г. Л. А. Жекулин работает в бригаде электро-связи ОТН Академии наук СССР по вопросам радиосвязи Москва — Хабаровск и решает при этом важнейшую задачу о влиянии магнитного поля земли на распространение радиоволн вдоль линии радиосвязи Москва — Хабаровск. В эти же годы Лев Анатольевич работает и в ЦНИИ Академии наук СССР. Здесь он занимается важной в практическом отношении задачей о многослойных электромагнитных экранах. В короткое время им была решена основная задача о плоском и цилиндрическом многослойном экране и начаты расчеты сферических экранов. Работы Л. А. Жекулина по электромагнитному экранированию были премированы Академией наук СССР в 1936 г.

В 1937—1939 гг. Л. А. Жекулин принимал участие в работе бригады по составлению третьего пятилетнего плана по развитию связи. Его исследования выяснили существенный вопрос о суммарном поглощении электромагнитных волн при прохождении их в ионосфере, что позволило решить в целом вопрос о предельной дальности связи. Исследования задачи об отражении электромагнитных волн от ионосферы и просачивании их сквозь ионосферу привели Л. А. Жекулина к решению практически важного вопроса о выборе рабочей частоты для радиосвязи.

В 1941 г. Л. А. Жекулин опубликовал работу «Неустановившийся режим в коаксиальном кабеле», в которой был рассмотрен вопрос о распространении кратковременных импульсов. Л. А. Жекулин показал, что распространяющийся по кабелю импульс с высокой несущей частотой



определяется функцией интегральности ошибок от комплексного мента. Так как эти функции в комплексном аргументе не табулированы Л. А. Жекулин в дальнейшем методике графического решения для ряда важнейших случаев. Изящным было его заключение, что процесс установления гармонических колебаний в коаксиальном кабеле валиентен задаче движения механической системы с одной степенью свободы действием силы малой продолжительности, например индикаторного устройства исследованного в известных работах акад. А. Н. Крылова.

В 1942 г. Л. А. Жекулин защитил докторскую диссертацию, посвященную исследованию неустановившихся процессов в поглощающих средах и системах с распределенными постоянными.

В послевоенное время особую значимость приобрела проблема коаксиального кабеля, по которому, как известно, могут быть осуществлены: одновременная передача нескольких сот телефонных разговоров, телеграфический обмен сообщениями и сверх того — телевидение. Работа Л. А. Жекулина, выполненная и опубликованная им еще в 1941 г. о неустановившемся режиме в коаксиальном кабеле, дала ответ на многие практические вопросы, связанные с осуществлением коаксиального кабеля в СССР. В 1944—1945 гг. Л. А. Жекулин опубликовал работы, выполненные в ОТН Академии наук СССР, по вопросу дифракции электромагнитной волны от шара. Эти работы имеют значение при оценке отражения ультракоротких волн от неоднородностей в тропосфере.

В 1947 и 1948 гг. Л. А. Жекулин вновь возвращается к исследованию проблем коаксиального кабеля. Им рассматриваются вопросы влияния неоднородностей в коаксиальном кабеле на распространяющиеся по нему сигналы, — вопросы, выдвинутые практикой. За работы по коаксиальному кабелю Л. А. Жекулину присуждена в 1947 г. первая премия Президиума Академии наук СССР.

Во всех своих исследованиях Л. А. Жекулин, следуя примеру своего учителя, крупнейшего советского ученого акад. М. В. Шулейкина, всегда глубоко анализирует физическую сторону вопроса, проводя полное и строгое решение задачи с приведением общих формул к виду, удобному для практических расчетов.

Много внимания и времени Л. А. Жекулин уделяет общественной деятельности. Он неоднократно выдвигался в качестве члена избирательных комиссий по выборам в верховные органы СССР и активно работает в Обществе работников высшей школы по производственным секторам.

За свою безупречную многолетнюю педагогическую работу Л. А. Жекулин награжден орденом Трудового Красного Знамени, орденом «Знак почета» и медалями.

Кандидат техн. наук, доц. В. М. ЛАВРОВ

МЭИ



В. ОКОРОКОВ. ЭЛЕКТРОПЛАВИЛЬНЫЕ ПЕЧИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ. Издание 3-е, переработанное. 32 стр., ц. 19 руб. 10 коп. Утверждено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для металлургических вузов. Металлургиздат, 1950.

Рассматриваемая книга является новым изданием изд. учебника Н. В. Окорочкова по электроплавильным печам для черной металлургии. Первое издание книги вышло в 1938 г., а второе — в 1945 г. Оба эти издания уже разошлись. Поэтому настоящее издание книги можно считать вполне современным.

Книга разбита на пять частей: первая часть посвящена дуговым печам, вторая — руднотермическим печам, третья — электрооборудованию дуговых печей, четвертая — дуговым печам и, наконец, пятая — печам сопротивления. Книга снабжена пятью приложениями и литературным указателем, содержащим 65 наименований.

Последние части книги резко отличаются друг от друга по объему, так и по значимости излагаемого материала. Это, по видимому, объясняется программными требованиями курса.

Большее место (около одной трети всей книги) посвящено дуговым сталеплавильным печам (первая часть). В главе 1 этой части автор приводит краткую классификацию сталеплавильных печей и показывает тенденции развития современных сталеплавильных печей.

Следующие четыре главы посвящены основным принципам конструирования сталеплавильных печей. Здесь рассматриваются основные зависимости между главными параметрами и эксплуатационными коэффициентами печи и ее размерами. Печи и мощностью трансформатора. Эти главы представляют особый интерес, так как в них делается попытка теоретического обоснования параметров сталеплавильной печи, исходя из взаимозависимости между габаритами печи и ее энергетическими параметрами.

В главе 2 автор выводит законы теплообмена печи и электропроводов. После этого дается подробное описание конструкции пода, боковых стенок и свода печи, а также расчеты тепловых потерь печи.

Глава 3 посвящена весьма краткому (семь страниц) рассмотрению электрических параметров сталеплавильных печей. Здесь разбираются соотношения между током, напряжением и мощностью печи и связь этих параметров с размерами печи. К сожалению, автор отказался от каких-либо теоретических обоснований и дал только приближенные закономерности, основанные на статистических и эмпирических материалах. В определенной степени согласиться с автором, когда он пишет, что «вопросы еще не вполне изучены и до сих пор нет материальных зависимостей между рассматриваемыми величинами» (стр. 147). Но все же электрические параметры печей стоило рассмотреть подробнее и привести хотя бы несколько примеров, которыми мы уже располагаем.

В главе 4 рассматриваются вопросы размещения печей в цехе. Автор рассматривает рабочие диаграммы печи. Вследствие нехватки места автор вынужден на стр. 147 сослаться на последующую часть книги. Методически такие ссылки на следующий материал в учебнике, конечно, неприемлемы.

В главе 5 «Стахановские методы улучшения эксплуатации дуговых сталеплавильных печей» дается обзор достижений наших передовых заводов. Однако эта глава написана очень сжато — в ней всего пять страниц. Этого, в изложении отдельных методов, имеющих целью повышение производительности печей, приводятся старые данные и почти не освещены достижения стахановцев в послевоенный период.

В следующих главах этой части даны методы расчета и конструирования числовыми примерами, что значительно облегчает понимание текста. После этого подробно рассматриваются механические конструкции печей.

В последней части книги («Руднотермические печи») дана классификация печей этого типа и рассмотрены энергетические балансы. К сожалению, автор приво-

дит всего два варианта баланса выплавки 45% ферросилиция. Для учебных целей этого, конечно, недостаточно; необходимо было дать энергетические балансы нескольких типичных ферросплавов и привести их не только в процентах, но и в абсолютных величинах, чтобы учащиеся могли ознакомиться с порядком обычных величин статей балансов.

В главе 5 автор, описав однофазные печи, подробно останавливается на их недостатках. В свое время эти печи (под названием «печи Миге») широко рекламировались в капиталистической прессе и частично эта реклама проникла и в нашу довоенную литературу. Разоблачение этой рекламы поможет учащемуся легко разобраться в достоинствах печей разных систем и автор, конечно, прав, когда в заключении этой главы пишет: «История этих печей (печи Миге) с несомненностью доказывает превосходство советской электротермической науки над зарубежной...».

В главе 6 описаны стахановские методы улучшения технических показателей руднотермических печей. Этому важному вопросу уделено весьма мало места (всего четыре страницы). Воспитательное и техническое значение стахановских методов труда очень велико, и в учебной литературе они должны быть освещены глубоко. Недостаточно подчеркнута здесь также влияние повышения мощности печи на к. п. д. и удельный расход электроэнергии и сырья.

Третья часть книги («Электрооборудование дуговых печей») начинается главой о применении комплексных чисел в теории переменных токов. В этой краткой (шесть страниц) главе сделана попытка объяснить читателю принципы применения комплексных чисел в теории переменных токов. Для читателя, незнакомого с теорией переменных токов, этого материала недостаточно, а для знающего эту теорию глава становится излишней. Лучше было бы и тут сослаться на курсы теоретической электротехники, как это сделал автор в отношении построения круговых диаграмм (стр. 271).

Во 2 главе (стр. 271—298) этой части рассматриваются круговые диаграммы контура печи. При этом автор, широко пользуясь работами проф. С. И. Тельного, рассматривает две схемы (разветвленную и неразветвленную), для которых дает методы построения электрических характеристик печей. Недостатком этого раздела является полное отсутствие численных примеров. В этой главе также ничего не сказано о построении круговых диаграмм и характеристик для несимметричных печей.

Глава 3 (299—329) посвящена короткой сети печей. В разделе об активном сопротивлении подробно рассмотрены явления поверхностного эффекта и эффекта близости. К сожалению, и тут отсутствуют численные примеры применительно к печам и характерные величины для сталеплавильных и руднотермических печей. Для читателя остается неясным, в какой степени важны эти эффекты для коротких сетей сталеплавильных и руднотермических печей, в каких случаях следует их учитывать и в каких можно пренебречь ими.

Для сталеплавильных и особенно для руднотермических печей очень большое значение имеет контактное сопротивление, а между тем этой важной проблеме уделено всего две страницы. Следовало подробнее дать теорию контакта и привести конкретные значения контактных сопротивлений, встречающихся в печных контурах. В этом разделе встречаются и неосторожные выражения. Автор утверждает, что контактное сопротивление «увеличивается с возрастанием температуры металлургических проводников» и «практически не зависит от площади контакта». Неискушенному читателю эти утверждения могут ввести в заблуждение.

Значительно полнее изложены методы расчета индуктивного сопротивления короткой сети печей. Здесь же

кратко освещено явление асимметрии мощностей («резкая» и «мертвая» фазы). В заключении этой главы освещен вопрос о потерях в стальных массах печного контура с приведением численного примера подсчета этих потерь.

Как мы видели, автор дает сначала круговые диаграммы и характеристики печного контура (гл. 2), а потом расчет сопротивления короткой сети (гл. 3). С методической точки зрения целесообразнее было бы переменить местами эти главы. Учащийся значительно лучше поймет сущность круговых диаграмм, если он предварительно уже ознакомились с параметрами печного контура.

В следующих четырех главах (гл. 4—7) описана природа мощной электрической дуги, управление дугами, электрические схемы печных установок и коммутационная аппаратура. В главе об электрической дуге приведены всего две осциллограммы дуги. Они, конечно, не могут характеризовать всего разнообразия форм кривых тока и напряжения печной дуги. Следовало дать больше иллюстративного материала.

Скупой иллюстрирована также глава о коммутационных схемах. Автор дает всего одну перспективную схему сталеплавильной установки. Этого недостаточно для того, чтобы учащийся освоился с электрическими схемами и научился их читать, а между тем в повседневной практике каждому электрометаллургу, работающему на электропечах, поневоле придется сталкиваться с электрическими схемами.

Печные трансформаторы и дроссели являются основной частью печного электрооборудования и автор посвящает им отдельную главу; в ней приводятся схемы замещения трансформатора, его векторная диаграмма и соотношения между его параметрами. После этой вводной части автор рассматривает специфические свойства печных трансформаторов и дросселей. В конце этой главы следовало дать некоторые сведения из ГОСТ на трансформаторы и дроссели и подчеркнуть, что они выпускаются по определенной шкале мощностей.

Значительное место уделено также автоматическим регуляторам дуговых печей. Сначала автор дает классификацию регуляторов по принципу действия и формулирует требования, предъявляемые к автоматическому регулированию, а потом описывает конструкции различных типов регуляторов. Так как в наших печных установках наибольшее распространение получили регуляторы системы ХЭМЗ, то автор более подробно описывает именно эти регуляторы.

Однако в этой главе не нашла отражения автоматизация производственных процессов, хотя сама партия и правительство, как известно, уделяет большое внимание.

Очень мало места уделено регулятору с электрическим усилителем, хотя регуляторы этого типа, обладающей чувствительностью, имеют ряд преимуществ перед регуляторами других типов и, по видимому, в дальнейшем получат большое распространение.

Далее автор описывает электропечные подстанции в достаточной подробности, охватывая материалы троподстанциях в объеме, необходимом инженеру-электротехнику специальности.

Печи со стальным сердечником, имеющие распространение, описаны кратко. Основное в четвертой части («Индукционные печи») уделено без сталеного сердечника. После подробного принципа действия этих печей автор дает методика а затем приводит примерный расчет. Значительное уделено описанию электрооборудования индукционных (статические конденсаторы, генераторы, излучающая аппаратура). Автор приводит параметры и виды оборудования, выпускаемого заводами. Глава этой части книги носит название: «Тепло и уход за печью». Вопросы надлежащей эксплуатации и повышения их производительности освещены, но специально тепловым балансам печи не должного внимания: приводимые в книге четыре отнесены в приложение без всякого анализа.

В черной металлургии печи сопротивления имеют ограниченное применение. Поэтому они описаны кратко (на пяти страницах).

По сравнению с первыми двумя изданиями 3-е издание книги значительно улучшено и больше творят требованиям, предъявляемым учебникам. Охватывает весь материал, требуемый программой, материал этот изложен хорошим языком.

Этой книгой могут пользоваться студенты не электрометаллургических специальностей, но и специальностей, а также инженеры-электрометаллурги работающие на производстве.

Доктор техн. наук, проф. Г. А. С

Грузинский политехнический институт им.



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(Издания 1951 г.)

Аршинов С. С., Персоян С. В., Эйленбург А. Н. ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ КОНТУРОВ ГЕНЕРАТОРОВ У. К. В. и К. В. (Отрезки длинных линий и объемные резонаторы). 92 стр., ц. 5 руб. Издательство «Советское радио».

Асеев Б. П. ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ В РАДИОТЕХНИКЕ. 248 стр., ц. 14 руб. 60 коп. Связьиздат.

Гуляев А. П. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. Издание 2-е, переработанное. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для машиностроительных вузов. 484 стр., ц. 20 руб. Оборонгиз.

В этой книге посвящены электротехническим материалам разделы: «Сплавы высокого электросопротивления», «Магнитные сплавы» и др.

Краев А. П. ОСНОВЫ ГЕОЭЛЕКТРИКИ. ч. 1. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия

для государственных университетов. 445 стр., ц. 9 руб. 60 коп. Издательство технико-теоретической литературы.

Красовский Б. Н. ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН (Академия наук СССР. Институт машиноведения). ц. 15 руб. Издательство Академии наук СССР.

Николаев Д. С. РУССКИЕ ОСНОВПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ И РАДИОЛОКАЦИИ. Рекомендательный список лекций к 15-й лекции из цикла «Россия — родина величайших изобретений». 6 стр., беспл. (Всесоюзное общество по распространению политехнических знаний. Центральная политехническая библиотека).

Черторижский К. В. ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СТАНКОВ. 223 стр., ц. 15 руб. 20 коп. Машигиз.

Чистяков Н. П. РАДИОПРИЕМНИКИ И РАБОТА РАДИОПРИЕМНИКА. Пособие для изучающих радиоприемники по описаниям. ц. 8 руб. 50 коп. Военно-морское издательство.

Юрченко В. П. ПЕРВАЯ КНИГА ПО ТЕЛЕВИДЕНИЮ (Радиотехническая под общей редакцией А. И. Берга, вып. 120) ц. 2 руб. Госэнергоиздат.

* Звездочкой отмечены книги, по которым, предполагается помещать рецензии.

К УКАЗАТЕЛЮ МАТЕРИАЛОВ, ПОМЕЩЕННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» В 1951 г.

В указателе (Электричество, № 12, 1951) пропущены статьи:

Гейлер Л. В. — Применение электродвигателей с повышенным скольжением для электроприводов металлорежущих станков. № 11, стр. 21

Листов П. Н. — Испытание электропруга в 1921 г. № 9, стр. 79

Секторов В. Р. — Ветроэнергетика за рубежом № 9, стр. 84



Сдано в набор 10/1 1952 г.

Объем 12 п. л.

T-02030

17 уч.-изд. листов

Тираж 16 350 экз.

Подписано к печати 7/III

Формат бумаги 60

34х

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА

**НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

**Орган Академии наук СССР, Министерства электростанций СССР
и Министерства электропромышленности СССР**

Основан в 1880 г. Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на широкие круги инженеров и научных работников, ведущих работу в различных областях электротехники.

В журнале широко освещаются основные теоретические и практические вопросы, связанные с развитием электротехники и электрификации народного хозяйства СССР.

Журнал ЭЛЕКТРИЧЕСТВО уделяет особое внимание вопросам внедрения новой передовой электротехники во всех отраслях народного хозяйства СССР.

В журнале освещаются новые научно-технические проблемы, связанные с вели-

чественными сооружениями Сталинской эпохи — Куйбышевской, Сталинградской, Каховской гЭС, Главным Туркменским каналом и другими энергетическими стройками.

В журнале систематически освещаются вопросы истории русской электротехники, печатаются рефераты и обзоры по отечественным и иностранным журналам и проводятся научно-технические дискуссии.

В журнале принимают участие виднейшие ученые и специалисты — электротехники Советского Союза.

12

**номеров
в ГОД
(144 печ. листа)**

**Годовым подписчикам на
журнал высылается календарь-
справочник на 1952 г.**

**Подписная
цена
96 руб.**

**Подписка на журнал ЭЛЕКТРИЧЕСТВО принимается во всех
отделениях Союзпечати и во всех почтовых отделениях**