ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

953 5

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ММУНИЗМ—ЭТО ЕСТЬ СОВЕТСКАЯ ВЛАСТЬ
ОС ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ВСЕЙ СТРАНЫ (Ленин)

УРНАЛ
СНОВАН
1880 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

5
1953
МАЙ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
И ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

СОДЕРЖАНИЕ

И. А. Сыромятников — Требования к синхронным двигателям и их схемам управления и защиты 3

Г. М. Каялов — Методика опытных исследований в промышленной электроэнергетике 7

В. В. Каплан и **В. М. Нашатырь** — О применении связанных колебательных контуров для испытания небыстродействующих высоковольтных аппаратов 13

М. М. Акодис — Принципы построения искусственных схем испытания дугогасящих устройств 18

И. М. Сирота — Подмагничивание трансформаторов тока нулевой последовательности 23

Е. К. Завадовская — Влияние пористости на электрическую прочность твердых диэлектриков 28

Р. Р. Харченко — Импульсная реакция приборов магнитоэлектрической системы 30

П. И. Кузнецов — Расчет переходных процессов в длинных линиях при помощи цилиндрических функций от двух независимых переменных 35

Г. М. Каспржак и **Л. Е. Алекин** — Вопросы теории саморегулирования при сварке плавящимся электродом 41

Л. К. Грейнер и **Н. Н. Никифоровский** — Управление высоковольтными выключателями на оперативном переменном токе 50

Г. И. Шевченко — Стабилизация выходного напряжения ионного преобразователя частоты 57

Н. А. Ростовцев — К расчету длинной линии постоянного тока в случае зависимости ее параметров от знака потенциала 62

А. С. Розенкранц — О моделировании электромагнитного аппарата переменного тока электрической цепью 67

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

А. И. Танатар — Схема включения электромагнитного реле времени, обеспечивающая зависимую от тока выдержку времени 75

ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

О. Б. Брон — М. О. Доливо-Добровольский — изобретатель искрогасительной решетки 77

ЗАМЕТКИ и ПИСЬМА

О термине „Реактивный двигатель" 79

ДИСКУССИИ

К статье Б. Г. Лорткипанидзе „О правилах защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами **Л. А. Вислоух.** К проекту раздела правил Проводки шинопроводами" **Б. С. Татко** 80

ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ

Задачи светотехники в реконструкции наружного освещения Москвы. Освещение фасадов высотных зданий. 14-я Сессия Международной конференции по электрическим сетям высокого напряжения в Париже. Диэлектрические усилители. Новый электровоз для товарных поездов. Вибрационная усталость стальных многопроволочных тросов. Электростанции, работающие на вулканическом паре. Номограмма для расчета магнитного напряжения зубцов электрических машин 83

ХРОНИКА

Совещание по использованию ветра. Профессор Е. И. Китаев 94

БИБЛИОГРАФИЯ

Е. М. Пухов и **В. А. Глебов** — Книга А. Е. Алексеева „Тяговые электродвигатели" 96

Номограмма для расчета магнитного напряжения зубцов электрических машин. Листовая электротехническая сталь марок Э1А, Э1АА и Э2А *(на 3-й странице обложки)*

◇ ◇ ◇

ВОЛОГОДСКАЯ
ОБЛАСТНАЯ
БИБЛИОТЕКА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Да здравствует 1 Мая — день международной солидарности трудящихся, день братства рабочих всех стран!

Выше знамя пролетарского интернационализма!

Рабочие и работницы, инженеры и техники электростанций и электропромышленности! Быстрее вводите в строй новые энергетические мощности! Бесперебойно обеспечивайте электроэнергией и электротехническим оборудованием возрастающие потребности народного хозяйства!

(Из призывов ЦК КПСС к 1 Мая 1953 г.)

Требования к синхронным двигателям и их схемам управления и защиты

Доктор техн. наук И. А. СЫРОМЯТНИКОВ

Москва

На основе сравнительных расчетов указывается на экономическую целесообразность расширения области применения синхронных двигателей в сторону малых мощностей. Предлагается отказаться от применяемых схем защиты минимального напряжения и сложных схем пуска и осуществлять пуск с приключенным возбудителем. Выдвигается ряд требований к синхронным двигателям в части системы возбуждения, пусковых характеристик и пр. Печатается в порядке обсуждения.

Вопрос о повышении коэффициента мощности в целях всемерного снижения потерь в сетях приобрел особую актуальность. В связи с этим необходимо рассмотреть и изыскать возможности расширения области применения привода с синхронными двигателями.

Синхронные двигатели в настоящее время успешно применяются для самых различных приводов, в том числе и с тяжелыми условиями пуска. В качестве примера можно привести опыт применения синхронных двигателей 217 *квт* для привода компрессоров в нефтяной промышленности Баку. За все время эксплуатации эти двигатели показали себя с самой лучшей стороны. Этот опыт опроверг сомнения некоторых специалистов, считавших, что синхронные двигатели для таких ответственных компрессоров будут ненадежны. Однако не вызывает сомнений целесообразность применения лишь синхронных двигателей, мощностью выше 100 *квт* вместо асинхронных. Что же касается синхронных двигателей меньшей мощности, то полной ясности в вопросе о целесообразности их применения вместо асинхронных еще нет. Неясно, что является более экономичным: применение асинхронного привода со статическими конденсаторами или синхронных двигателей.

В целях внесения ясности в этот вопрос ЦНИЭЛ МЭСЭП произвела сравнительные расчеты, конечные результаты которых приведены в таблице.

Сравнительные расчеты произведены для асинхронных короткозамкнутых двигателей мощностью 20, 28 и 40 *квт* единой серии в чугунном корпусе и синхронных двигателей той же мощности с пристроенным возбудителем, изготовленных на базе синхронных генераторов типа СГ на 1 000 *об/мин*. Для сопоставления взяты были также асинхронные короткозамкнутые двигатели мощностью 56 и 86 *квт* единой серии и серии ГАМ-6 и синхронные двигатели той же мощности серии СМ на 1 000 *об/мин*. Все сравниваемые двигатели низкого напряжения в защищенном исполнении.

Номинальная мощность двигателя на валу, *квт*	20	28	40	56	86
Затраты активной мощности, *квт*/100 *квар*	1,25 1,06	1,035 0,83	0,167 0	2,54 2,26	0,66 0,43
Капитальные затраты, *руб*/*квар*	54,8 42,2	44,2 33,7	32,2 22,8	67,8 59,5	44,4 33,6

Примечание. В знаменателе даны значения для синхронных двигателей системы инж. С. Г. Таманцева.

Для синхронных двигателей мощностью 20, 28 и 40 *квт* значения к. п. д. и cos φ принимались по данным для генераторов серии СГ. Потребляемая мощность синхронных двигателей определялась как $\frac{P \text{ на валу}}{\eta \cos \varphi}$, а стоимость — по данным для соответствующих генераторов СГ с поправкой, пропорциональной разности мощности генератора и потребляемой мощности двигателя (*ква*), и с поправочным коэффициентом на изготовление пусковой обмотки, равным 1,05. Для асинхронных двигателей мощностью 56 и 86 *квт* был сделан пересчет стоимостей пропорционально их мощности.

Выигрыш в реактивной мощности при установке синхронного двигателя вместо асинхронного был определен как сумма реактивной мощности, потребляемой асинхронным двигателем, и

реактивной мощности, отдаваемой в сеть синхронным двигателем, работающим с опережающим $\cos \varphi = 0{,}8$.

Капитальные затраты на 1 *квар* при установке синхронного двигателя определялись путем деления разности в цене синхронного и асинхронного двигателей на выигрыш реактивной мощности. Затрата активной мощности на создание реактивной была вычислена как разность потребляемых синхронным и асинхронным двигателями активных мощностей, деленная на значение полученной реактивной мощности.

При синхронных двигателях капитальные затраты на 1 *квар* колеблются в пределах 32... 55 руб., достигая только для двигателя мощностью 56 *квт* 68 руб. (таблица), в то время как затраты на 1 *квар* статических конденсаторов без стоимости монтажа при напряжении 380 *в* составляют 106 руб., а при напряжении 220 *в*— 190 руб.

Таким образом, при синхронных двигателях стоимость повышения коэффициента мощности в 1,6...3,3 раза (при 380 *в*) или 2,8...6 раз (при 220 *в*) ниже, чем при асинхронных двигателях и компенсации $\cos \varphi$ статическими конденсаторами. Затраты активной мощности при синхронных двигателях колеблются в пределах от 0,167 до 1,25 $\frac{квт}{100\ квар}$, достигая лишь для двигателя 56 *квт* [1] 2,26 $\frac{квт}{100\ квар}$. Потери же в статических конденсаторах составляют 0,4...0,5 $\frac{квт}{100\ квар}$.

Из изложенного следует, что применение синхронных двигателей мощностью меньше 100 *квт* вполне целесообразно.

Синхронные двигатели имеют и другие преимущества. При наличии форсировки возбуждения они повышают устойчивость работы энергосистемы при кратковременных снижениях напряжения, вызванных короткими замыканиями. Кроме того, они позволяют регулировать напряжение, повышая тем самым качество электроэнергии и обеспечивая наиболее выгодный режим напряжения.

Соответствующим заводам Министерства электростанций и электропромышленности следует в самое ближайшее время приступить к выпуску синхронных двигателей на широкий диапазон мощностей в количествах, обеспечивающих потребности народного хозяйства.

Отсутствие в достаточном количестве синхронных двигателей и статических конденсаторов благоприятствовало внедрению в практику такого несовершенного способа повышения коэффициента мощности, как синхронизация асинхронных двигателей с фазным ротором. Дело доходило до технического абсурда, когда для новых установок специально заказывались асинхронные двигатели с фазным ротором, с тем чтобы их синхронизировать. Порочность такой практики очевидна.

Синхронные двигатели с машинным возбудителем, несмотря на наличие коллектора и колец, показали себя с хорошей стороны в эксплуатации; наличие обмотки возбуждения не вызвало повышенной аварийности этих машин.

Наличие машинного возбудителя значительно удорожает стоимость синхронного двигателя и, по мере уменьшения номинальной мощности двигателя сравнительная стоимость возбудителя возрастает. Весьма большой интерес представляют синхронные двигатели без машинных возбудителей. Такие двигатели могут быть изготовлены на базе компаундированных синхронных генераторов с механическим выпрямителем системы С. Г. Таманцева [Л. 1].

Синхронные двигатели мощностью до 100 *квт* дадут возможность повысить коэффициент мощности в установках, электрически наиболее удаленных от электростанций: именно здесь применение этих двигателей даст наибольший технико-экономический эффект.

При проектировании новых типов синхронных двигателей всех мощностей необходимо учесть требования эксплуатации в части повышения некоторых технических показателей. В ряде типов синхронных двигателей не обеспечено втягивание в синхронизм с полной нагрузкой, что исключает ресинхронизацию после выпадения их из синхронизма. Значения предельного (потолочного) возбуждения некоторых типов возбудителей малы. Применяемые заводами схемы пуска и релейной защиты неоправдано сложны и ненадежны в эксплуатации.

В практике эксплуатации неоднократно имело место развитие аварий, причиной которого были ненадежные схемы защиты и автоматики. Особенно большой вред приносит применяемая сейчас защита минимального напряжения с небольшой выдержкой времени, которая отключает весьма ответственные двигатели при кратковременных понижениях напряжения и тем самым наносит громадный ущерб предприятию.

Проведенные в Советском Союзе за последние годы работы показали, что давно назрела необходимость в пересмотре этих схем, заимствованных преимущественно из зарубежной практики. В настоящее время нет никакой необходимости перенимать этот весьма сомнительный «мировой» опыт.

Рассмотрим кратко требования к основным параметрам, пусковым характеристикам, схемам защиты и автоматики, которые, по нашему мнению, следует учесть при проектировании новых типов синхронных двигателей.

Система возбуждения. Система возбуждения синхронных двигателей должна удовлетворять следующему основному требованию: при снижениях рабочего напряжения примерно на 15% ток ротора должен устройством форсировки возбуждения увеличиваться не менее чем в 2 раза против номинального тока ротора. Продолжительность форсировки возбуждения определяется, исходя из условия допустимой перегрузки ротора

[1] Двигатель СМ-114 56 *квт* наиболее неудачный в серии СМ: его к. п. д. 88%, что на 2% ниже, чем у остальных двигателей данной серии, а стоимость за установленный киловатт — самая высокая, даже выше, чем у малых генераторов серии СГ.

током, в 1,5 раза бо́льшим номинального, в течение 2 мин. и в 2 раза бо́льшим номинального в течение 1 мин.

Форсировка возбуждения является весьма эффективным средством повышения устойчивой работы как самого двигателя, так и всей энергосистемы в целом при кратковременных понижениях напряжения в сети. Как известно, не при всех к. з. в сети напряжение снижается до нуля. В весьма большом числе случаев остаточное напряжение при к. з. достаточно для сохранения синхронных двигателей в синхронизме. И чем больше величина тока ротора при форсировке, тем при большем снижении напряжения может быть сохранена устойчивая работа синхронных двигателей.

Форсировка возбуждения повышает напряжение, увеличивая тем самым устойчивость как возбуждаемого двигателя, так и других двигателей. Значительно облегчаются условия самозапуска ответственных асинхронных двигателей. Форсировка возбуждения облегчает втягивание двигателя в синхронизм. В ряде случаев только благодаря форсировке возбуждения удалось обеспечить надежную синхронизацию синхронных двигателей при пуске под полной нагрузкой.

Указанному выше требованию удовлетворяет так называемая система прямого возбуждения, при которой возбудитель выполняется в виде машины постоянного тока, насаженной на вал двигателя. При системе косвенного возбуждения от отдельно стоящего двигатель-генератора постоянного тока рекомендуется установка маховика для увеличения махового момента. Это обеспечит более надежную работу двигателя при кратковременных понижениях напряжения.

Совершенно неприемлемы системы возбуждения, у которых обмотки роторов синхронных двигателей питаются от выпрямителей, включенных в ту же сеть, от которой получают питание двигатели. При такой системе возбуждения, предложенной авторами ДАГ, ток ротора не только не увеличивается при снижении напряжения в сети, а наоборот, понижается, в результате чего устойчивость синхронного двигателя уменьшается.

В отличие от этого у компаундированных синхронных машин системы С. Г. Таманцева применена комбинированная система возбуждения. Ток возбуждения при этой системе зависит не только от напряжения на зажимах генератора, но и от тока статора. Параметры обмотки напряжения и трансформаторов тока подобраны таким образом, что напряжение на выводах синхронной машины поддерживается достаточно точно без применения каких-либо дополнительных устройств. Преимущество такой системы очевидно и не нуждается в специальном обосновании.

Вместо механического выпрямителя могут применяться и полупроводниковые выпрямители, но при обязательном условии применения компаундирования, с тем чтобы было обеспечено питание обмотки возбуждения синхронной машины при глубоких снижениях напряжения за счет тока статора.

Перегрузочный момент. Величина перегрузочного момента имеет весьма большое значение, как определяющая устойчивость работы двигателя в синхронном режиме при снижениях напряжения и технологической перегрузке. Синхронный двигатель хорош до тех пор, пока он работает синхронно. При выпадении же из синхронизма двигатель потребляет большую реактивную мощность из сети и тем самым снижает напряжение, что особенно нежелательно во время и после отключения к. з. Поэтому должны быть приняты все меры для обеспечения сохранения в синхронизме синхронных двигателей во время аварийных снижений напряжений, вызванных к. з.

Применение быстродействующей релейной защиты и форсировки возбуждения при величине перегрузочного момента порядка 1,6 от номинального в подавляющем большинстве случаев позволит обеспечить устойчивую работу синхронных двигателей.

Пусковые характеристики. Все синхронные двигатели, как правило, должны допускать прямой пуск от полного напряжения сети, позволяющий отказаться от применения автотрансформаторов, реакторов и специальных пусковых обмоток. Практика показывает, что в подавляющем большинстве случаев по условиям сети прямой пуск может быть применен. Его применение целесообразно и с точки зрения нагрева ротора. Как известно, при пуске без нагрузки энергия, выделяющаяся в роторе, практически не зависит от напряжения. При пуске же под нагрузкой количество энергии, выделяющейся в роторе, будет больше при меньшем напряжении. Поэтому для двигателей со специальной обмоткой для пуска по условиям нагрева всегда более целесообразно повышать напряжение при пуске. Исключение составляют двигатели с массивным ротором. У этих двигателей глубина проникновения тока при пуске сравнительно невелика и поэтому в некоторых случаях пуска возможен недопустимый нагрев поверхностного слоя, так как теплоотдача от него в глубь ротора вследствие кратковременности процесса пуска мала.

Электромашиностроительные заводы для некоторых типов двигателей не допускают прямого пуска, ограничивая величину напряжения при пуске. Учитывая большие преимущества прямого пуска, следует считать совершенно необходимым, чтобы выпускаемые заводами двигатели всех мощностей предназначались для прямого пуска.

Для осуществления прямого пуска не требуется вложения в машины излишних дорогостоящих материалов, как это полагают некоторые специалисты. Необходимо применить только более усиленное крепление лобовых частей в виде кронштейнов и колец из черного металла, а также простых прокладочных материалов и шпагата. Таким образом, никаких серьезных доводов против применения прямого пуска для всех типов двигателей нет. Имеющиеся в настоящее время ограничения технически не обоснованы и продиктованы излишней перестраховкой.

Прямой пуск двигателей уже много лет применяется рядом предприятий, хотя он и не допускался заводами-изготовителями. Двигатели работают

вполне надежно. Дополнительные крепления лобовых частей некоторых двигателей, потребовавшиеся при переходе к прямому пуску, были весьма просто осуществлены силами самих предприятий.

Следует остановиться на вопросе о допустимой кратности пускового тока. Некоторые специалисты предъявляют требование о снижении пускового тока до величины порядка 3,5...4-кратной номинальному. Такое требование в подавляющем большинстве случаев необоснованно. Как известно, асинхронный момент, развиваемый двигателем, при прочих равных условиях тем больше, чем выше пусковой ток. Пусковой ток, равный 5...7-кратному номинальному току двигателя, вполне допустим.

Схемы пуска. Схемы пуска следует максимально упростить. Применяемые в настоящее время схемы пуска совершенно неприемлемы по своей сложности. Эти схемы требуют квалифицированного обслуживания и, кроме того, удорожают установки.

Самое широкое применение должна получить схема пуска с постоянно приключенным возбудителем [Л. 2]. В этой схеме обмотка ротора двигателя без всяких промежуточных аппаратов подключена к якорю возбудителя. Реостат возбуждения возбудителя находится в рабочем положении. Пуск осуществляется включением выключателя, двигатель разворачивается, самовозбуждается и втягивается в синхронизм без применения какой-либо специальной автоматики. В результате получается схема, аналогичная схеме асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Схема применена на ряде установок и проявила себя с весьма хорошей стороны. При этой схеме наиболее просто обеспечивается самозапуск двигателей. Имеющиеся у некоторых специалистов опасения о недопустимости такого режима пуска для двигателя и возбудителя необоснованы. Практика подтвердила полную безопасность такого пуска.

Для успешного втягивания синхронного двигателя в синхронизм при пуске необходимо, чтобы нарастание тока ротора происходило при достижении двигателем подсинхронной скорости. Если нарастание тока ротора будет происходить раньше, то возможны колебания тока статора, а в некоторых случаях двигатель вообще не втянется в синхронизм. В таких случаях пуск следует производить также с приключенным возбудителем, но с введенным в цепи возбуждения возбудителя сопротивлением. Спустя некоторое время после пуска сопротивление замыкается.

Учитывая, что схема пуска синхронного двигателя с постоянно приключенным возбудителем дает большую экономию в аппаратуре и упрощает эксплуатацию двигателей, следует считать необходимым все вновь проектируемые двигатели рассчитывать на такой способ пуска. Некоторое увеличение стоимости двигателя и дополнительная затрата активных материалов безусловно окупятся за счет отказа от магнитной станции и удешевления эксплуатации.

Релейная защита и автоматика. Релейную защиту и автоматику синхронных двигателей следует максимально упростить. Каждый двигатель должен иметь максимальную защиту, выполненную в виде одного или двух зависимых реле с отсечкой. Эта защита обеспечивает надежное отключение двигателя при выпадении из синхронизма. В зависимости от мощности может применяться продольная дифференциальная защита. Никаких специальных защит вроде защиты пусковой обмотки от обрыва поля и от затяжного пуска устанавливать не нужно. Защита минимального напряжения может устанавливаться только с выдержкой времени порядка 10 *сек* для отключения двигателя при исчезновении напряжения.

Все синхронные двигатели с машинными возбудителями должны иметь устройство релейной форсировки возбуждения с использованием предельного напряжения возбудителя. Уставка реле минимального напряжения должна быть порядка 0,85 рабочего напряжения двигателя. Для синхронных двигателей без машинных возбудителей должна быть обеспечена форсировка возбуждения любым иным способом, увеличивающим ток возбуждения при аварийных снижениях напряжения.

Автомат гашения поля следует устанавливать только у тех двигателей, которые по характеру привода имеют длительный выбег после отключения от сети. Гашение поля следует осуществлять включением сопротивления в цепь возбуждения возбудителя. Пуск синхронного двигателя должен быть автоматизирован.

Выводы. Синхронные двигатели наряду с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором должны получить самое широкое распространение в промышленности. Необходимо организовать выпуск синхронных двигателей малой и средней мощности на базе генераторов конструкции С. Г. Таманцева.

При проектировании новых типов синхронных двигателей обязательно должны быть учтены требования, изложенные выше, в частности обеспечение форсировки возбуждения при понижениях напряжения в сети до двойного номинального тока ротора, и возможность пуска с полной нагрузкой с постоянно приключенным возбудителем. Коэффициент полезного действия должен быть повышен.

Применение таких двигателей даст большой народнохозяйственный эффект.

В заключение следует сказать несколько слов об одном неудачном термине, установленным в ГОСТ на электрические машины. Это так называемый входной момент. Название «входной момент» дает основание считать, что, например, при входном моменте, равном единице, при номинальном моменте будет обеспечено надежное втягивание в синхронизм при пуске с номинальной нагрузкой. Это, конечно, неверно и в практике имели место случаи неправильного выбора синхронных двигателей по входному моменту.

Литература

1. С. Г. Таманцев. Синхронный генератор с самовозбуждением от механического выпрямителя и автоматическим регулированием напряжения. Электричество, № 3, 1952.

2. В. М. Матюхин. Пуск синхронных двигателей с приключенным возбудителем. ВЭП, № 1, 1937.

[19. 7. 1952]

◇ ◇ ◇

Методика опытных исследований в промышленной электроэнергетике

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

Новочеркасский политехнический институт им. Орджоникидзе

Предлагается система параметров работы промышленных электроприемников и указывается простая методика опытного их определения, позволяющая, в частности, организовать текущий контроль загрузки оборудования и использования его во времени. Система параметров может послужить исходной базой для обоснованной методики расчета питающих электросетей. Статья использует и существенно дополняет результаты предыдущей работы автора (Электричество, № 4, 1951). Печатается в порядке обсуждения.

Введение. В ряде отраслей производства за последние годы была проведена большая практическая работа по определению энергетических параметров работы промышленных электроустановок, в основном — в части норм удельного потребления энергии. Однако общие принципы экспериментальных методов промышленной электроэнергетики еще не получили должной разработки и систематического изложения, особенно в части потребления электрической мощности.

В машиностроении, в кожевенной, текстильной и некоторых других отраслях промышленности общее энергопотребление определяется сейчас для всей совокупности различных электроприемников переменного тока малой и средней мощности. Между тем актуальная для этих отраслей энергетики задача определения средних значений параметров для групп приемников данной категории еще не получила удовлетворительного решения.

Можно указать следующие основные дефекты существующей практики опытного исследования промышленных электроустановок:

1. Отсутствие единой рациональной системы параметров, характеризующей потребление приемниками электрической энергии и мощности с полнотой и определенностью, необходимыми для нужд рациональной эксплуатации и проектирования.

2. Сложность, трудоемкость и высокая стоимость обследований, требующих применения либо регистрирующих приборов, либо частых отсчетов по электрическим счетчикам (через каждые 10 ... 30 *мин*).

Эти дефекты приходится поставить в связь с безуспешностью попыток установления количественных соотношений между коэффициентами спроса и использования на основе грубо упрощенных представлений: путем введения дополнительных коэффициентов (одновременности и др.) применения чисто эмпирических формул [Л. 6].

В итоге настоящее положение вопроса характеризуется: 1) в практике опытных исследований—стремлением определять коэффициент спроса непосредственно из данных опыта [Л. 6], минуя физические параметры режима работы электроприемников; 2) в практике проектных расчетов нагрузок — прямым эмпирическим выбором значений коэффициента спроса, минуя количественный анализ определяющих эти значения параметров установки. Эту практику нельзя не признать вынужденной и вряд ли технически прогрессивной.

Основываясь на экспериментально установленных в [Л. 1] физических представлениях о формировании и свойствах графиков нагрузки промышленных электрических сетей, а также на сделанных на основе этих представлений по методу упорядоченных диаграмм теоретических выводах, в статье предлагается рациональная система параметров работы электроприемников, а также методика опытного их определения, которые имеют целью обеспечить возможность:

1) постановки текущего, например ежесменного, контроля загрузки электрифицированных агрегатов и использования их во времени;

2) упрощения самой методики обследований, сделав их доступными для работников отдела главного энергетика завода при сравнительно небольшой затрате времени;

3) обоснованного расчета всех элементов системы электроснабжения новостроящегося предприятия с аналогичными электроприемниками;

4) организации массовых обследований, позволяющих за сравнительно короткие сроки получить и обобщить необходимые опытные данные.

Вытекающие из полученных выводов более подробные указания инструктивного порядка по проведению обследований промышленных электроустановок, по обработке опытных материалов, а также по проектным и эксплуатационным расчетам электрических сетей выходят за рамки статьи.

Система параметров работы промышленного электроприемника. Для большего удобства определения энергетических параметров будем рассматривать графики нагрузки электроприемников — активной или реактивной мощности либо тока — в преобразованном виде упорядоченных диаграмм [Л. 1], т. е. с ординатами, расположенными в порядке убывания (рис. 1). Дальнейшее изложение ведется для большей определенности применительно к асинхронным электроприводам, но все выводы распространяются в основном на любой другой тип приемников переменного тока, потреб-

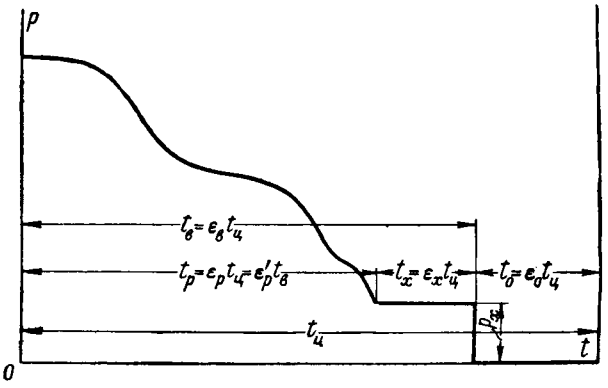


Рис. 1. Упорядоченная диаграмма нагрузки асинхронного электропривода за один цикл технологического процесса.

ляющих активную и реактивную электроэнергию (например, сварочные трансформаторы).

Комплексная энергетическая характеристика электроприемника и режима его работы должна охватывать следующие три группы величин: 1) потребление электроэнергии (активной и реактивной); 2) потребление мощности (активной и реактивной); 3) время включения.

Система соответственных параметров[1] приведена в таблице, при составлении которой учтены следующие соображения:

1. В существующей практике при расчете реактивной нагрузки Q и потребления реактивной энергии W_p исходят из величины активной нагрузки P:

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi,$$

при этом значение $\operatorname{tg} \varphi$ берется то же, что и для аналогичных действующих установок, по существу, без учета имеющихся неизбежных различий. В целях устранения этого дефекта для реактивных нагрузок введены параметры, совершенно аналогичные таковым для активных нагрузок.

2. Согласно [Л. 1] то же сделано и для токовых нагрузок.

3. Параметры M и m введены для установления связи между показателями работы двигателя как потребителя энергии с одной стороны, и как элемента электрифицированного агрегата, — с другой.

В таблицу не включены производные параметры, относящиеся ко времени включения привода (рис. 1): $t_в = \varepsilon_в t_ц$, и связанные с соответственными параметрами таблицы, отнесенными (кроме параметров M и m) ко всему времени технологического цикла $t_ц$, очевидными соотношениями:

$$k_{u\varepsilon} = \frac{k_u}{\varepsilon_в} = k_з;\ k_{f\varepsilon} = k_f \sqrt{\varepsilon_в}, \qquad (1)$$

и аналогичными им — для $I_з$, $I_{f\varepsilon}$; $g_з$, $g_{f\varepsilon}$, где $k_з$, $I_з$, $g_з$ — коэффициенты загрузки.

[1] Строчные буквы (p, q, i) относятся к одному приемнику, а прописные P, Q, I — к суммарным параметрам группы приемников; принятое в [Л. 1] обозначение коэффициента формы k_f сохранено ради большей четкости лишь для графиков активной мощности.

Система параметров для характеристики электропривода с асинхронным двигателем и режима его работы

Объект характеристики	Наименование параметра	Условные обозначения	Формула
Электропривод	Номинальная (установленная) мощность, *квт* . .	$p_н$	—
	Активная мощность на зажимах при холостом ходе привода *, *квт*	p_x	$k_x\ p_н$
	Реактивная мощность при номинальной нагрузке, *квар*	$q_н$	—
	То же при холостом ходе привода, *квар*	q_x	$l_x\ q_н$
	Ток при номинальной нагрузке, *а*	$i_н$	—
	То же при холостом ходе привода, *а*	i_x	$g_x\ i_н$
Нагрузка электропривода	Средняя активная мощность на зажимах, *квт*	$p_{ср}$	$\frac{1}{t_ц}\int_0^{t_ц} p\,dt$
	Действующая мощность на зажимах *, *квт*	$p_э$	$\sqrt{\frac{1}{t_ц}\int_0^{t_ц} p^2 dt}$
	Средняя реактивная мощность, *квар*	$q_{ср}$	$\frac{1}{t_ц}\int_0^{t_ц} q\,dt$
	Действующая реактивная мощность *, *квар*	$q_э$	$\sqrt{\frac{1}{t_ц}\int_0^{t_ц} q^2 dt}$
	Средний ток, *а*	$i_{ср}$	$\frac{1}{t_ц}\int_0^{t_ц} i\,dt$
	Действующее значение тока, *а*	$i_э$	$\sqrt{\frac{1}{t_ц}\int_0^{t_ц} i^2 dt}$
Потребление энергии	Удельный расход активной энергии на зажимах электропривода на единицу продукции, *квтч/ед. прод*	w_a	$p_{ср}\ t_ц$
	То же реактивной энергии, *кварч/ед. прод*	w_p	$q_{ср}\ t_ц$
Использование электропривода во времени	Относительное время работы * при загруженном рабочем механизме (рис. 1)	ε_p	$\frac{t_p}{t_ц}$
	То же при холостом ходе механизма*	ε_x	$\frac{t_x}{t_ц}$
	Относительное время включения привода	$\varepsilon_в$	$\varepsilon_p + \varepsilon_x = \frac{t_в}{t_ц}$
	Относительное время паузы *	ε_0	$1 - \varepsilon_в$
	Продолжительность одного цикла нагрузки, *сек* . . .	$t_ц$	—

Продолжение

Объект характеристики	Наименование параметра	Условные обозначения	Формула
Режим нагрузки электропривода	Коэффициент использования активной мощности .	k_u	$\frac{p_{cp}}{p_н} = \frac{w_a}{p_н\, t_ц}$
	То же реактивной мощности	l_u	$\frac{q_{cp}}{q_н} = \frac{w_p}{q_н\, t_ц}$
	То же тока	g_u	$\frac{i_{cp}}{i_н}$
	Коэффициент формы графика активной мощности	k_f	$\frac{p_э}{p_{cp}}$
	То же реактивной мощности *	l_f	$\frac{q_э}{q_{cp}}$
	То же тока	g_f	$\frac{i_э}{i_{cp}}$
Загрузка электропривода за время включения	Средний момент двигателя за время включения . .	M_{cp}	$\frac{1}{\varepsilon_в\, t_ц}\int_0^{t_ц} M dt$
	Эффективный момент двигателя за время включения *	$M_э$	$\sqrt{\frac{1}{\varepsilon_в\, t_ц}\int_0^{t_ц} M^2 dt}$
	Коэффициент загрузки привода (по моменту на валу) за время включения . .	m_u	$\frac{M_{cp}}{M_н}$
	Коэффициент формы нагрузочной диаграммы двигателя (по моменту) за время включения	m_f	$\frac{M_э}{M_{cp}}$

* Эти величины находят относительно меньшее применение.

Согласно [Л. 1] знание параметров таблицы достаточно не только для суждения о режиме работы агрегатов, но и для расчета питающих их электрических сетей. Вместе с тем опытное определение значений этих параметров, как показано ниже, требует обобщения результатов опытов в виде снятия двух показаний двух или трех электрических счетчиков, в начале и конце одного производственного цикла (смены).

Зависимость тока и реактивной мощности приемника от его загрузки. Для теории и практики промышленной электроэнергетики основное значение имеют аналитические выражения для тока и мощности электрифицированного агрегата в функции от его загрузки.

В приложении I выведены следующие приближенные формулы для тока статора i и реактивной мощности q асинхронного двигателя в функции от относительной величины $m = \frac{M}{M_н}$, момента на его валу:

$$\frac{i^2}{i_н^2} = g^2 = k_E^2 g_0^2 + \left(\frac{1}{k_E^2} - k_E^2 g_0^2\right) m^2, \qquad (2)$$

$$\frac{q}{q_н} = l = k_E^2 l_0 + \frac{1 - l_0}{k_E^2} m^2 \qquad (3)$$

(условные обозначения — согласно таблице и приложению I), справедливые при

$$0 \leqslant m = \frac{M}{M_н} \leqslant 1{,}5; \quad 0{,}925 \leqslant k_E = \frac{U}{U_н} \leqslant 1{,}10. \qquad (4)$$

Аналогичные зависимости можно привести и для других типов приемников переменного тока, потребляющих активную и реактивную энергию (сварочные трансформаторы и др.).

Формула (3) обнаруживает существенное обстоятельство: реактивная мощность асинхронного двигателя численно связана с моментом на его валу гораздо проще, чем активная мощность на его зажимах.

Действительно, при фиксированных величинах момента на валу и подведенного напряжения реактивная мощность и ток двигателя в отличие от активной мощности на зажимах практически не зависят от величины активного сопротивления в цепи ротора. Поэтому, в частности, формулы (2) и (3) сохраняют достаточную точность и при пуско-регулирующем режиме, что не имеет места для формулы активной мощности на зажимах. Последняя к тому же более сложна, а при $U \neq U_н$ требует разделения потерь в двигателе, тогда как в формулы (2) и (3) ни к. п. д., ни потери в двигателе вообще не входят.

Следует подчеркнуть, что для отключенного от сети электропривода мы имеем $p = q = i = m = 0$ и формулы (2) и (3) теряют силу; это обстоятельство использовано далее для опытного определения среднего относительного времени включения $\varepsilon_в$ по группе электроприемников.

Наконец, заметим, что из (2) и (3) следует:

1) определение среднеквадратичного тока нагрузки одного длительно включенного двигателя может быть выполнено с помощью одного счетчика реактивной энергии;

2) проверка необходимой мощности действующего асинхронного электропривода может быть выполнена по диаграмме его реактивной нагрузки $q = \varphi(t)$.

Опытное определение параметров работы промышленных электроприемников. Коренное снижение трудоемкости опытных исследований действующих установок согласно предлагаемой методике, основанной на материалах приложений I и II, достигается за счет обоснованного отказа от применения регистрирующих приборов и от снятия показаний счетчиков через короткие интервалы времени.

Для опытного определения коэффициентов использования k_u и l_u в принципе достаточны два счетчика — активной и реактивной энергии. То же относится и к коэффициенту g_u, поскольку среднее значение тока $i_{cp} = g_u i_н$ будет опре-

деляться с помощью приближенной (с недостатком) формулы:

$$i_{cp} \approx \frac{p_{cp}}{\sqrt{3}U\cos\varphi_{cp}} = \frac{\sqrt{p_{cp}^2+q_{cp}^2}}{U\sqrt{3}} \leqslant$$

$$\leqslant \frac{1}{U\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{t_ц}\int_0^{t_ц}\sqrt{p^2+q^2}\,dt, \qquad (5)$$

причем $\operatorname{tg}\varphi_{cp} = \frac{q_{cp}}{p_{cp}}$. Для группы приемников таким путем находятся средние значения $k_и$ $l_и$, $g_и$.

При рабочем напряжении на зажимах U, отличающемся от $U_н$, поправочный коэффициент k_E в формулах (2) и (3) можно с достаточной точностью найти, измерив среднеквадратичное значение напряжения $U_э \approx U_{cp}$ за время испытания с помощью счетчика вольтквадратчасов. Счетчик [Л. 5] выполнен в виде обычного однофазного счетчика активной энергии, в котором обмотка тока также подключается на напряжение сети, но через малый трансформатор напряжения (мощностью порядка 1,5 *ва*) либо даже через потенциометр с трансформатором тока.

Принципиально и практически важно уметь просто находить из опыта значение параметра $\varepsilon_в$, определенным образом характеризующего совместно с параметром $g_и$ фактическое использование приводов во времени и их загрузку за время включения. Существенна открывающаяся возможность непосредственного определения усредненной величины $\varepsilon_в$ для целой группы приводов, что вряд ли удобоисполнимо другим способом.

В случае одного электропривода требуется снятие двух показаний двух счетчиков — реактивной энергии и амперквадратчасов („счетчики потерь") [Л. 6], а при наличии существенных колебаний напряжения — также и вольтквадратчасов. Из показаний счетчиков вычисляется:

$$\varepsilon_в = \frac{1}{k_E^2}\cdot\frac{l_и - Ag_э^2}{l_0 - Ag_0^2}, \qquad (6)$$

где

$$g_э = \frac{i_э}{i_н};\quad A = \frac{1-l_0}{1-k_E^4 g_0^2}.$$

Для вывода формулы (6) достаточно взять средние за время включения $t_в = \varepsilon_в t_ц$ (рис. 1) значения от левой и правой частей формул (2) и (3), что дает два уравнения (см. обозначения в таблице и приложении 1):

$$\left.\begin{aligned}\frac{g_э^2}{\varepsilon_в} &= k_E^2 g_0^2 + \left(\frac{1}{k_E^2} - k_E^2 g_0^2\right)m_э^2;\\ \frac{l_и}{\varepsilon_в} &= k_E^2 l_0 + \frac{1-l_0}{k_E^2}m_э^2.\end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Определив из первого уравнения $m_э^2$ и подставив во второе, мы и придем к формуле (6).

Опытное определение среднего значения $\varepsilon_в$ для заданной группы электроприводов можно производить по двум показаниям двух счетчиков — активной и реактивной энергии; в случае необходимости учесть колебания напряжения добавляется счетчик вольтквадратчасов. Величина $\varepsilon_в$ определяется из квадратного уравнения:

$$k_E^2\left[l_0 - \frac{(1-l_0)g_0^2}{1-k_E^4 g_0^2}\right]\varepsilon_в^2 - l_и\varepsilon_в + \frac{(1-l_0)g_и^2 g_{f\varepsilon}^2}{1-k_E^4 g_0^2} = 0, \qquad (8)$$

которое получается из (6) путем подстановки значения (см. приложение II)

$$g_э = \frac{i_э}{i_н} = \frac{g_f i_{cp}}{i_н} = g_f g_и = \frac{g_{f\varepsilon}\cdot g_и}{\sqrt{\varepsilon_в}};$$

при этом в (8) можно принять $g_{f\varepsilon} \approx \frac{1+g_{f\varepsilon\,макс}}{2}$, взяв $g_{f\varepsilon\,макс}$ из (22).

Наряду с величиной $g_и$ коэффициент формы G_f графика токовой нагрузки имеет основное значение для разработанного в [Л. 1] способа расчета силовых сетей по пропускной способности по методу упорядоченных диаграмм. Для графика нагрузки одного приемника величина g_f определяется опытно, одновременно с величиной $\varepsilon_в$.

Для группы приемников среднее значение g_f связано с коэффициентом формы G_f графика суммарной нагрузки зависимостью [Л. 1]

$$g_f = \sqrt{1+n_э(G_f^2-1)}, \qquad (9)$$

где $n_э$ — эффективное число приемников [Л. 1]. Однако G_f близко к единице, и формула (9) дает значительную погрешность. Именно поэтому счетчики амперквадратчасов и формула (6) не рекомендуются в случае группы приемников.

Для группы приемников величину g_f целесообразно определять через найденное из опыта значение $\varepsilon_в$ по формуле $g_f = \frac{g_{f\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_в}}$, (10)

так как в формуле

$$G_f = \sqrt{1+\frac{g_f^2-1}{n_э}} = \sqrt{1+\frac{\frac{g_{f\varepsilon}^2}{\varepsilon_в}-1}{n_э}}; \qquad (11)$$

величина $g_{f\varepsilon}$ уже при небольших $n_э$ незначительно влияет на G_f (см. приложение II).

Таким образом, величина $\varepsilon_в$ приобретает основное значение для расчетов электрических сетей [Л. 1], заменяя g_f на основании соотношения (11). Значение l_f для расчета активных потерь от передачи реактивной энергии опреде-

ляется соотношением, аналогичным (10) (приложение II):

$$l_f = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_в}}. \qquad (12)$$

Непосредственно вытекающая из (11) и (12) с учетом [Л. 1] возможность использования параметров таблицы для расчетов электрических промышленных сетей, равно как и дальнейшие указания по исследованию работы электроприемников по показаниям счетчиков, составляет самостоятельную тему. Укажем лишь еще, что все измерения должны сопоставляться с производительностью агрегатов за время отсчетов и что результаты измерений должны обрабатываться обоснованными статистическими методами.

Приложение I. Для тока статора i асинхронного двигателя имеет место важная формула В. А. Шубенко [Л. 2]:

$$i^2 = i_0^2 + (i_н^2 - i_0^2)\, m^2, \qquad (13)$$

справедливая при величине относительного момента на валу $m = \frac{M}{M_н} \leqslant 1{,}5$; i_0 — ток холостого хода двигателя при отключенном рабочем механизме.

Учитывая реальные условия эксплуатации, обобщим эту формулу на случай рабочего напряжения $U = k_E U_н \neq U_н$. Примем приближенно, что

$$i_{0E} \approx k_E i_0; \quad i_{нE} \approx \frac{i_н}{k_E},$$

где $i_{нE}$ — ток, отвечающий $M = M_н$ при $U = k_E U_н$;

i_{0E} — соответствующий ток холостого хода двигателя. Тогда получим:

$$i^2 = k_E^2 i_0^2 + \left(\frac{i_н^2}{k_E^2} - k_E^2 i_0^2\right) m^2$$

или

$$g_E^2 = \left(\frac{i}{i_н}\right)^2 = k_E^2 g_0^2 + \left(\frac{1}{k_E^2} - k_E^2 g_0^2\right) m^2, \qquad (14)$$

Формулу для реактивной мощности q выведем с помощью (14) из схемы замещения асинхронного двигателя. В общепринятых обозначениях будем иметь:

$$q = i_1^2 x_1 + i_0^2 x_0 + i_2'^2 x_2'. \qquad (15)$$

Выражение для i_2' можно получить из (14), положив $i_0 = 0$, что дает $i_2' \approx m i_н$.

С учетом (14) из (15) найдем:

$$q = i_0^2 (x_0 + x_1) + m^2 [(i_н^2 - i_0^2) x_1 + i_н^2 x_2'] \qquad (16)$$

или

$$q = q_0 + (q_н - q_0)\, m^2; \qquad (17)$$

здесь q_0 — реактивная мощность холостого хода приемника.

Уместно заметить, что в [Л. 3] эта формула получена более сложным путем, а в [Л. 4] вообще не приведена. Формула (13) также не привлекла к себе должного внимания и не приведена в [Л. 3, 4].

Для обобщения формулы (10) на случай $U = k_E U_н$ полагаем:

$$q_{0E} \approx k_E^2 q_0; \quad q_{нE} \approx k_E^2 i_0^2 x_0 + \frac{i_н^2}{k_E^2}(x_1 + x_2'),$$

отсюда

$$q = k_E^2 q_0 + \frac{q_н - q_0}{k_E^2} m^2$$

или

$$l = \frac{q}{q_н} = k_н^2 l_0 + \frac{1 - l_0}{k_E^2} m^2 \qquad (18)$$

(условные обозначения даны в таблице).

Проведенная автором экспериментальная проверка формул (14) и (18) на двигателе типа „Урал" мощностью 5,8 *квт*, 220 *в*, 1 445 *об/мин*, дала при $0 \leqslant m \leqslant 1$ в пределах $0{,}925 \leqslant k_E \leqslant 1{,}1$ наибольшую погрешность не выше 6%.

Входящие в (14) и (18) i_0, q_0 для большинства типов отечественных двигателей даны в [Л. 3]. При отсутствии данных их можно выбирать, пользуясь также [Л. 3].

Заметим еще, что между соответственными параметрами g_0 и l_0 имеет место соотношение

$$g_0 = \frac{i_0}{i_н} = \frac{i_0 U_н \sqrt{3}}{i_н U_н \sqrt{3}} = \frac{g_0 \sin \varphi_н}{g_0 \sin \varphi_0} \approx l_0 \sin \varphi_н; \qquad (19)$$

с другой стороны, можно считать, что при холостом ходе привода мы имеем (см. табл.):

$$l_x \approx l_0; \qquad (20)$$

отсюда ясно, что усредненные значения параметров l_0 и g_0 для группы электроприводов данной категории можно найти по расходу реактивной энергии при одновременной работе вхолостую всех электроприводов с помощью формул:

$$l_0 = \frac{\Sigma q_0}{\Sigma q_н} = \frac{l_x}{k_E^2}; \quad g_0 = \frac{\Sigma i_0}{\Sigma i_н} = \frac{l_x \sin \varphi_н}{k_E^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi_н = \frac{Q_н}{P_н}. \qquad (21)$$

Приложение II. Ток нагрузки электроприемника изменяется лишь в пределах от некоторого наибольшего значения $i_{макс}$ до тока холостого хода $i_x \geqslant i_0 > 0$. Аналогичные, отличные от нуля минимальные значения p_x и q_x имеют за время включения приемника графики активной и реактивной мощности.

Можно показать, что для любого графика с заданными значениями $i_{макс}$ и $i_{мин} = a i_{макс}$ (рис. 2) коэффициент формы $g_{f\varepsilon}$, отвечающий времени включения, не может превзойти

$$g_{f\varepsilon\, макс} = \frac{1 + a}{2\sqrt{a}} = \frac{\frac{i_{макс} + i_{мин}}{2}}{\sqrt{i_{макс}\, i_{мин}}}. \qquad (22)$$

Этот максимум реализуется для всех тех графиков, упорядоченная диаграмма которых представляет двухступен-

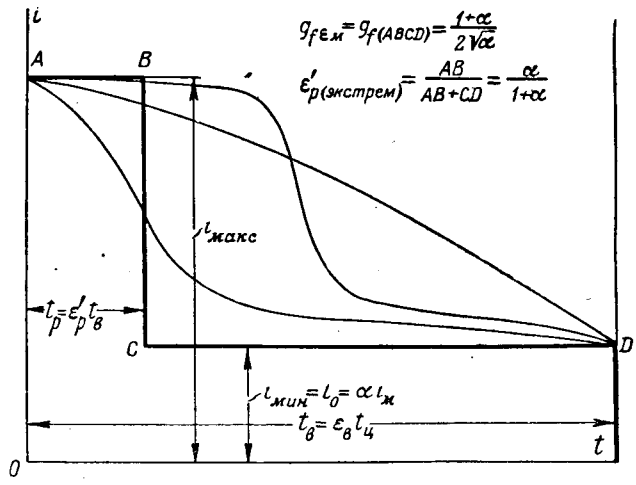


Рис. 2. Упорядоченная диаграмма нагрузки электроприемника за время его включения с максимальным возможным значением коэффициента формы.

чатую ломаную (рис. 2), с относительной продолжительностью ступени $i_{макс}$ за время включения, равной:

$$\varepsilon_p' = \frac{t_p}{t_в} = \frac{\alpha}{1+\alpha} = \frac{i_{мин}}{i_{макс}+i_{мин}}. \qquad (23)$$

Можно считать очевидным тот факт, что максимум $g_{f\varepsilon}$ отвечает некоторой двухступенчатой упорядоченной диаграмме, ввиду чего строгое доказательство здесь опускается; отсюда формулы (22) и (23) легко находятся из условия максимума величины $g_{f\varepsilon}^2$ при двухступенчатой диаграмме:

$$g_f^2 = f(\varepsilon_p') = \frac{\varepsilon_p' + \alpha^2(1-\varepsilon_p')}{[\varepsilon_p' + \alpha(1-\varepsilon_p')]^2}, \qquad (24)$$

В частности, для асинхронного двигателя $i_0 \approx 0{,}3 i_н$, так что при $i_{макс} = (1 \ldots 1{,}5)\, i_н$ будет $g_{f\varepsilon\, макс} = 1{,}2 \ldots 1{,}3$; с другой стороны, величина $q_0 \approx 0{,}8 q_н$, так что при $M_{макс} = (1 \ldots 1{,}5)\, M_н$, как легко убедиться, с большой точностью величина $l_{f\varepsilon} \approx 1$ независимо от характера нагрузки за время включения.

Но и найденные максимальные значения $g_{f\varepsilon}$ отвечают согласно (23) лишь нереально большим, порядка 0,8, значениям параметра $\varepsilon_x' = 1 - \varepsilon_p'$ работы вхолостую (рис. 2). Уточнить реально возможное значение $g_{f\varepsilon\, макс}$ можно, определив параметр ε_p' эквивалентной двухступенчатой диаграммы по известной величине коэффициента использования тока

$$g_u = g_{э}\varepsilon_в. \qquad (25)$$

Действительно, из условия

$$i_{макс}\varepsilon_p' + i_0(1-\varepsilon_p') = \frac{g_u i_н}{\varepsilon_в}$$

следует:

$$\varepsilon_p' = \frac{\frac{g_u}{\varepsilon_в} - g_0}{g_{макс} - g_0},$$

где $g_{макс} = \frac{i_{макс}}{i_н}$, $g_0 = \frac{i_0}{i_н}$ (g_0 можно заменить на $g_x = \frac{i_x}{i_н} \geqslant g_0$), отсюда согласно (22)

$$g_{f\varepsilon м} = \sqrt{\frac{\varepsilon_в}{g_u}\left[(g_{макс}+g_0) - \frac{\varepsilon_в}{g_u} g_{макс} g_0\right]}. \qquad (26)$$

В заключение заметим, что в литературе [Л. 7] имеются указания на ограниченность отношения $\frac{M_э}{M_{ср}}$ в нагрузочных диаграммах электроприводов, но сущность вопроса выясняют лишь формулы [2] (22) и (23).

Литература

1. Г. М. Каялов. Основы анализа нагрузок и расчета электрических сетей промышленных предприятий. Электричество, № 4, 1951.

2. В. А. Шубенко. Работа индукционного двигателя с упрощенным одноступенчатым регулятором скольжения. Труды Уральского индустриального института, вып. 28, 1948.

3. Л. В. Литвак. Вопросы повышения cos φ, Госэнергоиздат, 1950.

4. И. А. Сыромятников. Режимы работы асинхронных электродвигателей, Госэнергоиздат, 1950.

5. Ф. А. Катков. Счетчики потерь. Сборник трудов Института электротехники АН УССР, вып. 4.

6. Д. С. Лившиц. Расчетные нагрузки электросетей. Электричество, № 12, 1949.

7. Н. П. Куницкий. Электрооборудование прокатных и термических цехов, ГОНТИ, 1938.

[12. 11. 1952]

[2] Сравнительно незадолго до набора статьи автору стало известно, что С. А. Ринкевич в разработанном им для определения удельных расходов энергии в машиностроении методе „станкокиловаттчасов" предложил (1947—1948 г.) способ определения коэффициента включения $\varepsilon_в$, также основанный на использовании счетчиков реактивной электроэнергии, который несколько проще изложенного, но предполагает постоянство реактивной мощности двигателя при различных нагрузках. Помимо уточнения изложенная в статье методика позволяет обобщить и распространить метод „станкокиловаттчасов" С. А. Ринкевича на электросварку.

Работники научных учреждений и высшей школы! Двигайте вперед советскую науку! Смелее развертывайте критику недостатков в научной работе! Укрепляйте связь науки с производством, улучшайте и расширяйте подготовку специалистов для народного хозяйства!

(Из призывов ЦК КПСС к 1 Мая 1953 г.)

О применении связанных колебательных контуров для испытания небыстродействующих высоковольтных аппаратов

Кандидат техн наук В. В. КАПЛАН, инж. В. М. НАШАТЫРЬ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Описываются схемы связанных колебательных контуров, позволяющие испытывать в одно-и двухчастотных колебательных контурах небыстродействующие высоковольтные аппараты без применения подпитывающего синхронного генератора.

В колебательном контуре А. А. Горева для испытания высоковольтных аппаратов на отключающую способность (рис. 1,*а*) используются медленно затухающие синусоидальные колебания, совпадающие по форме с кривой тока короткого замыкания в реальной цепи [Л. 1]. Колебательный контур применяется прежде всего для испытания быстродействующих выключателей. Если же время горения дуги выключателя достаточно велико и напряжение на дуговом промежутке значительно, то испытание на контуре становится затруднительным, так как при этом испытательный ток заметно затухает.

При соответствующем выборе аппаратуры испытательной установки затухание, обусловленное потерями в конденсаторах, реакторах и шинопроводе, может быть сведено к достаточно малой величине. Однако затухание, вызванное активными потерями в дуге, определяющее в основном снижение величины испытательного тока, может быть скомпенсировано лишь посторонним источником энергии.

Для приближенной оценки влияния дугового промежутка выключателя на ток в колебательной цепи напряжение на дуге в течение каждого полупериода может быть принято равным некоторой постоянной величине. Как известно, для современных высоковольтных выключателей, у которых дуговой промежуток подвергается в процессе отключения интенсивному газовому дутью, такое представление напряжения на дуге достаточно близко к действительности. Поэтому процесс в контуре можно определить, заменяя дуговой промежуток источником бесконечной мощности с э.д.с., равной напряжению на дуге u_a. При этом могут быть применены обычные методы решения, разработанные для линейных цепей, в частности метод наложения. В соответствии с этим при пренебрежении активными потерями в реакторах, конденсаторах и шинопроводе ток i в колебательном контуре при наличии дугового промежутка с напряжением на дуге u_a (рис. 2) может быть представлен как сумма незатухающего синусоидального тока i', проходящего в цепи при отсутствии дуги, и тока i'', обусловленного дуговым промежутком. Как видно из приведенных кривых (рис. 2), „искажающий ток“ i'' в течение каждого полупериода сохраняет синусоидальную форму. Ток в испытательной цепи i также имеет синусоидальную форму, но величина тока уменьшается с каждым полупериодом горения дуги. В ряде случаев ток затухает столь заметно, что становится затруднительным правильно трактовать результаты испытания, поскольку форма тока слишком сильно отличается от формы кривой тока короткого замыкания в сети.

Для возможности проведения на контуре полноценных испытаний аппаратов со значительным временем горения дуги необходимо в течение всего процесса испытания компенсировать активные потери в контуре. Для этого А. А. Горев предложил использовать синхронный генератор, подключаемый через повышающий трансформатор и синхронизи-

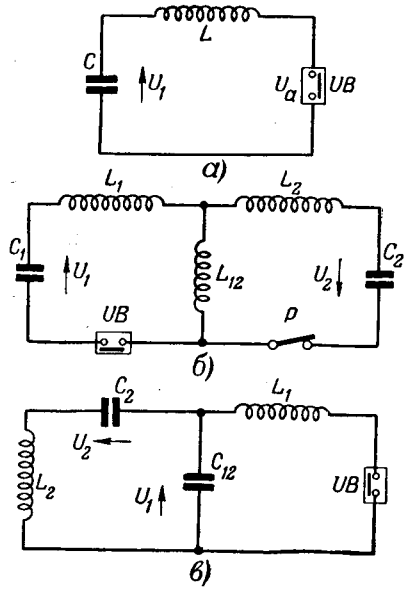


Рис. 1. Схемы колебательных контуров для испытания высоковольтных аппаратов

а — колебательный контур А. А. Горева; *б* — связанный колебательный контур с индуктивной связью; *в* — связанный колебательный контур с емкостной связью. C_1, C_2, C_{12} — конденсаторные батареи; L_1, L_2, L_{12} — реакторы; *ИВ* — испытуемый выключатель.

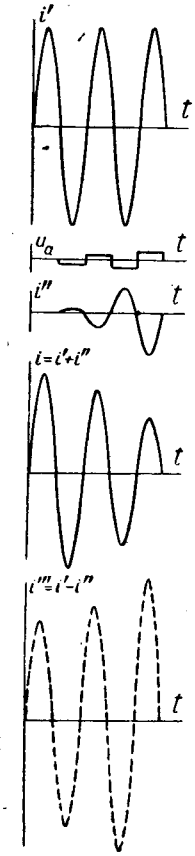


Рис. 2. Токи и напряжения на дуге в схеме колебательного контура.

рующее устройство параллельно конденсаторной батарее контура. Если частота подпитывающего генератора совпадает с частотой собственных колебаний контура, то в указанной схеме имеет место резонанс токов, и энергия генератора расходуется лишь на покрытие активных потерь в контуре [Л. 2]. Несколько схем включения подпитывающего генератора, также основанных на явлении резонанса, было предложено В. С. Луговым.

Использование для подпитки контура синхронного генератора ограниченной мощности, вообще говоря, дает принципиальную возможность скомпенсировать затухание в контуре в относительно длительный промежуток времени. Однако это требует в дополнение к контуру установки специального синхронного генератора с достаточно сложным оборудованием для его обслуживания. В то же время при испытании современных выключателей нет необходимости поддерживать незатухающие колебания в контуре сравнительно длительное время, как это позволяет выполнить генератор, а достаточно ограничиться подпиткой в течение трех-восьми полупериодов. Поэтому тот же эффект может быть достигнут, если для поддержания незатухающих колебаний в течение указанного промежутка времени будет использован не генератор, а оборудование, однотипное с применяемым в контуре, — конденсаторы и реакторы. Наиболее мощные современные выключатели выполняются, как правило, быстродействующими, и при их испытании отпадает необходимость в подпитке контура. При испытании же выключателей со значительным временем горения дуги и ограниченной отключающей способностью не используется полная мощность контура и часть конденсаторов может быть выделена для осуществления схем, обеспечивающих нормальный режим испытания без применения подпитывающего генератора.

Как будет видно из дальнейшего, в этом случае незатухающие колебания могут быть получены при использовании лишь оборудования самого контура и простейших синхронизирующих устройств, и дополнительных затрат на осуществление данных схем, по существу, не требуется.

Для проведения испытаний в достаточно эквивалентных условиях необходимо, чтобы затухание тока имело такой же характер, как и при коротких замыканиях в сети, а восстанавливающееся напряжение соответствовало номинальному напряжению аппарата. Поэтому при разработке схем для испытания аппаратов со значительным временем горения дуги основная задача состоит в подборе испытательной цепи, которая обеспечивала бы соответствующую форму кривой тока и напряжения. Как видно из графиков рис. 2, кривая результирующего тока, отключаемого испытуемым аппаратом, установленным в соответствующую испытательную цепь, могла бы представлять собой незатухающие синусоидальные колебания (кривая i'), например, в том случае, если бы форма кривой тока в этой цепи при металлическом коротком замыкании[1] была подобна кривой тока i''' ($i''' = i' - i''$), а форма кривой искажающего тока, „генерируемого" фиктивным генератором, заменяющим дуговой промежуток, была подобна кривой тока i''. Токи i''' и i'' близки по форме к кривым тока, получающимся в случае биения колебаний. Это дает возможность использовать для решения поставленной задачи переходные процессы в связанных колебательных контурах.

Переходные процессы в связанных колебательных контурах (рис. 1,*б*) при наличии дугового промежутка в испытуемом аппарате также могут быть рассмотрены путем замещения дуги фиктивным генератором с э.д.с. u_a. Разъединитель P, подключающий дополнительный контур к испытательной цепи, в общем случае может быть замкнут через время t_0 после начала разряда в первом контуре.

Если принять условие, что $\frac{C_1}{C_2} = \frac{L_2}{L_1} = \frac{U_2}{U_1} = m$, то ток в испытательной цепи при металлическом коротком замыкании может быть найден из выражения

$$i_1(t) = \frac{I_1}{m+1} \times$$

$$\times \left[\frac{m \sin \beta}{\cos \psi} \cos(\omega_2 t - \psi) + \frac{\sin \beta}{\cos \varphi} \cos(\omega_1 t + \varphi) \right], \quad (1)$$

где

$$I_1 = U_1 \omega_0 C_1, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1(L_1 + L_{12})}}, \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{C_1 L_1}},$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{C_1(L_1 + L_0)}}, \quad \operatorname{tg} \psi = \gamma_2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}, \operatorname{tg} \varphi = \frac{\gamma_1 (m + \cos \beta)}{\sin \beta}$$

и

$$\beta = \omega_0 t_0, \quad L_0 = \frac{m+1}{m} L_{12}, \quad \gamma_1 = \sqrt{1 + \frac{m}{m+1} \frac{L_0}{L_1}},$$

$$\gamma_2 = \sqrt{1 - \frac{1}{m+1} \frac{L_0}{L_1 + L_0}}.$$

Ток $i_1(t)$ есть сумма двух гармонических колебаний; в испытательной цепи имеет место биение колебаний ($\omega_1 > \omega_2$), и через некоторый промежуток времени t_1 ток достигает наибольшего амплитудного значения I_1', равного сумме амплитуд составляющих колебаний. В соответствии с (1)

$$I_1' = \frac{m \sin \beta \sqrt{1 + \gamma_2^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2}} + \sqrt{\sin^2 \beta + \gamma_1^2 (m + \cos \beta)^2}}{m+1} I_1. \quad (2)$$

Выберем время сдвига $t_0 = \frac{\beta}{\omega_0}$ между моментом начала разряда в испытательной цепи и моментом подключения дополнительного контура с таким расчетом, чтобы к моменту достижения током $i_1(t)$ амплитудного значения I_1' энергия ΔW, пере-

[1] Когда контакты выключателя остаются замкнутыми в течение всего процесса протекания тока.

даваемая из дополнительного контура в испытательную цепь, была равна энергии W_2, предварительно сосредоточенной в батарее емкости C_2: $\Delta W = W_1' - W_1 = \frac{L_1'}{2}(I_1'^2 - I_1^2)$, а $\frac{W_2}{W_1'} = \frac{C_2 U_2^2}{C_1 U_1^2} = m$. Это условие приводит к выражению

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{m}\left[\left(\frac{I_1'}{I_1}\right)^2 - 1\right] = \frac{1}{m}\left\{\left[\frac{m \sin\beta \sqrt{1+\gamma_2^2 \operatorname{tg}^2\frac{\beta}{2}} + \sqrt{\sin^2\beta + \gamma_1^2 (m+\cos\beta)^2}}{m+1}\right] - 1\right\} = 1. \qquad (3)$$

Если в связанных цепях индуктивность плеча связи L_{12} меньше индуктивностей контуров L_1 и L_2, то $L_0 \ll L_1$ и L_2. При этом $\omega_1 \approx \omega_2 \approx \omega_0$, $\gamma_1 \approx 1$ и $\gamma_2 \approx 1$.

Учитывая последние соотношения, из (3) получим следующее выражение для определения угла β:

$$\sin\frac{\beta}{2} = \frac{1}{4(m-1)} \sqrt{\sqrt{16\cdot[8m-(m-1)(m+1)]^2 - (m+1)^2(m+5)(m+3)} - 4\cdot[8m-(m-1)(m+1)^2]}. \qquad (4)$$

Рассмотрим частный случай. Пусть $m = 1$. При этом включение дополнительного контура производится приблизительно в момент достижения током испытательной цепи амплитудного значения $\left(\beta \approx \frac{\pi}{2}\right)$. Как видно из графика рис. 3, ток i_1, построенный по уравнению (1), при $m = 1$ и $\beta = \frac{\pi}{2}$ имеет действительно характер биений и в течение произвольно регулируемого промежутка времени t_1 происходит непрерывное увеличение амплитуды тока в испытательной цепи (ср. с кривой i'' на рис. 2). Время t_1 легко регулируется изменением индуктивности плеча связи, так как в этом случае угловая частота биений

$$\omega' = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \approx \frac{1}{4}\omega_0 \frac{L_0}{L_1}. \qquad (5)$$

Далее рассмотрим, какой характер в связанных колебательных контурах имеет искажающий ток, учитывающий влияние дугового промежутка. В N-ный полупериод горения дуги (при $m = 1$)

$$i_{1(N)} \approx -\omega_0 C_1 \left[\sum_{k=1}^{N} (U_{a(k-1)} + U_{ak}) \times \cos\omega'\left(t - \frac{(k-1)\pi}{\omega_0}\right)\right] \sin\omega_0 t, \qquad (6)$$

причем $U_{a0} = 0$. Здесь U_{ak} — напряжение на дуговом промежутке в k-тый полупериод ($U_{ak} = nocm$).

График тока i_1' (рис. 4) показывает, что влияние дугового промежутка на процессы в связанном контуре имеет тот же характер, как и в обычном колебательном контуре (ср. с кривой i'' на рис. 2). На рис. 4 изображена кривая тока i, отключаемого выключателем, испытываемым в связанном контуре. Напряжение на дуге равно u_a. Ток i равен

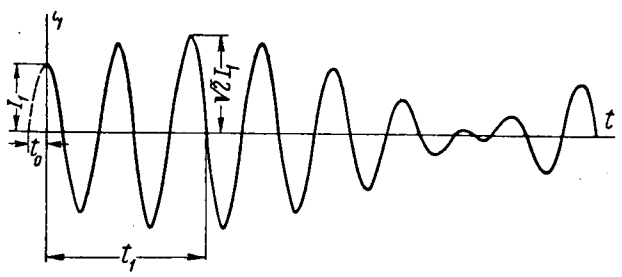


Рис. 3. Ток в связанном колебательном контуре.

сумме тока i_1, проходящего в связанной цепи при отсутствии выключателя, и искажающего тока i_1', учитывающего влияние дуги. Ток i представляет собой практически незатухающие синусоидальные колебания, что подтверждает возможность использования связанных контуров для испытания небыстродействующих высоковольтных аппаратов. Графики рис. 2 и 4 построены для одних и тех же параметров обычного контура и испытательной цепи связанных контуров ($m = 1$) и при заданной кривой напряжения на дуге u_a. Амплитуда пятого полупериода испытательного тока в обычном контуре уменьшается по сравнению с амплитудой тока в первый полупериод на 41% (рис. 2), в то время как в связанном контуре амплитуда тока сохраняется неизменной (рис. 4).

Если за время t_1 ток в испытательной цепи больше затухает, то в конденсаторной батарее дополнительного контура C_2 должно быть сосредоточено соответственно больше энергии. Например, при $m = 2$ амплитуда испытательного тока возрастет в 1,73, при $m = 3$—в 2,0, при $m = 4$—в 2,24 раза и т. д. При выборе угла сдвига β в соответствии с (4) достигается оптимальная работа схемы, поскольку в процессе испытания вся энергия, предварительно сосредоточенная в дополнительном контуре, передается в испытательную цепь.

Для проведения рассматриваемых испытаний можно использовать не только индуктивно связанные цепи, но и контуры с емкостной связью, переходные процессы в которых носят аналогичный характер. В этом случае все индуктивности в схеме рис. 1,*б* заменяются емкостями, а емкости — индуктивностями.

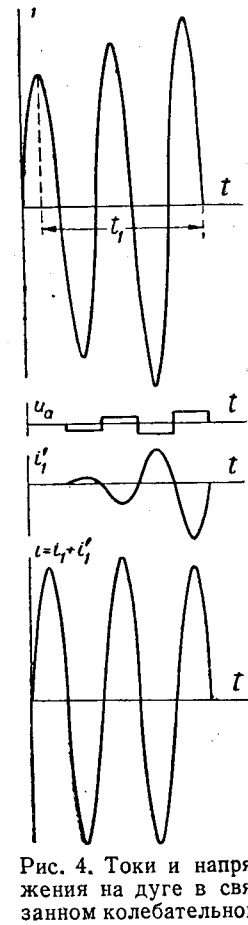


Рис. 4. Токи и напряжения на дуге в связанном колебательном контуре.

При применении связанных контуров с индуктивной связью в случаях, когда продолжительность горения дуги составляет несколько полупериодов, индуктивность связи L_{12} может быть соизмерима или даже больше индуктивности основного контура L_1. Кроме того, возможны случаи, когда требуемая индуктивность L_1 настолько мала по сравнению с L_{12}, что ее можно вовсе исключить. Соответственно при применении контуров с емкостной связью C_{12} может быть меньше емкости основного контура C_1 и в отдельных случаях емкость C_1 может быть равной бесконечности (шунтируется). В качестве примера на рис. 1,*в* приведена подобная схема с емкостной связью. Отметим, что в этом случае для осуществления передачи энергии нет необходимости сдвигать начало процесса в дополнительном контуре по сравнению с началом разряда в основном контуре и оба контура могут быть включены одновременно.

Схема испытательной установки. Связанные колебательные контуры можно использовать как при проведении испытаний на обычном одночастотном колебательном контуре, так и для компенсации затухания в цепи отключаемого тока двухчастотного колебательного контура при испытании выключателей со времени горения дуги в несколько полупериодов [Л. 1]. На рис. 5,*а* приведена одна из схем одночастотного контура, использующего для компенсации потерь связанную цепь с индуктивной связью, а на рис. 5,*б*— двухчастотного контура, в котором цепь отключаемого тока выполнена в виде связанного контура с емкостной связью. В схеме рис. 5,*а* дополнительный контур C_2—L_2 подключается к испытательной цепи через специальную схему, обеспечивающую сдвиг начала прохождения тока в дополнительном контуре по отношению к началу разрядного режима в испытательной цепи. Это дает возможность: 1) передать в испытательную цепь всю энергию, сосредоточенную в батарее C_2; 2) передать подпитывающую энергию в последние полупериоды горения дуги, когда затухание тока особенно заметно.

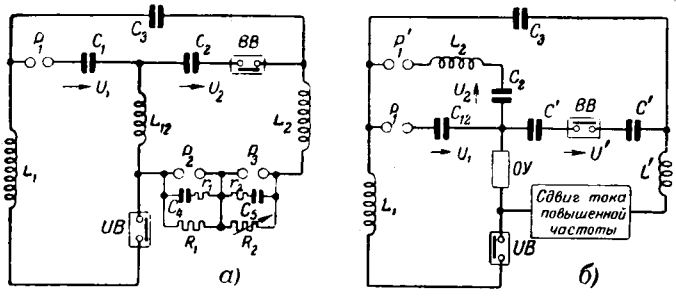


Рис. 5. Принципиальные схемы одночастотного (*а*) и двухчастотного (*б*) колебательных контуров, использующих связанные колебательные контуры для испытания аппаратов со значительным временем горения дуги.

C_1, C_2, C_{12}, C'—конденсаторные батареи; L_1, L_2, L_{12}, L'—реакторы; *ВВ*—вспомогательный выключатель; *ИВ*—испытуемый выключатель; *ОУ*—отключающее устройство; C_3—запальная емкость; P_1, P'_1—запальные разрядники; P_2, P_3, C_4; C_5, r_1, r_2, R_1, R_2—разрядники, конденсаторы, успокоительные и шунтирующие сопротивления схемы сдвига.

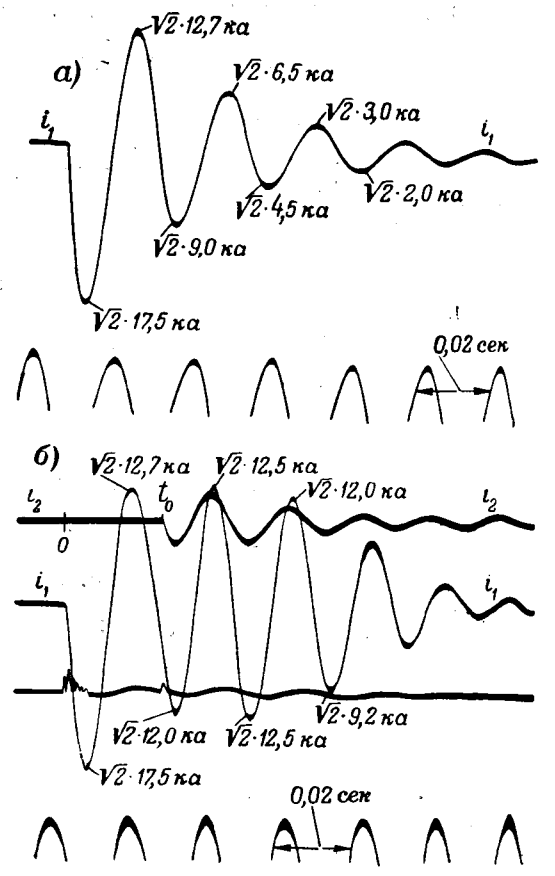


Рис. 6. Сравнительные осциллограммы тока в колебательном контуре (*а*) и в связанном колебательном контуре (*б*) при металлическом коротком замыкании.

В качестве синхронизирующих устройств используются „схема одновременности" и „схема сдвига", ранее разработанные в лаборатории ТВН ЛПИ [Л. 4,5]. Начало испытаний связано с включением вспомогательного выключателя *ВВ* (рис. 5). При этом срабатывает разрядник P_1, так как емкость между электродами разрядника значительно меньше, чем емкость вспомогательного конденсатора C_3, и при включении *ВВ* к нему оказывается приложенным суммарное напряжение конденсаторных батарей C_1 и C_2. Прохождение тока в дополнительном контуре начинается лишь спустя время t_0, когда пробьются разрядники P_2 и P_3. При включении *ВВ* напряжение U_2 распределяется между конденсаторами C_4 и C_5; разрядники P_2 и P_3 не срабатывают. В дальнейшем начнется перераспределение напряжения между разрядниками, так как $R_1 > R_2$, и в момент времени t_0, когда напряжение на P_2 достигнет пробивной величины, срабатывает разрядник P_2, а затем и P_3.

В двухчастотном колебательном контуре (рис. 5,*б*), в котором использована емкостная связь по схеме рис. 1,*в*, аналогично предыдущему, при включении *ВВ* срабатывает разрядник P_1, а затем и P'_1.

Работа связанных колебательных контуров была экспериментально проверена в лаборатории ТВН ЛПИ при проведении испытаний на одно- и

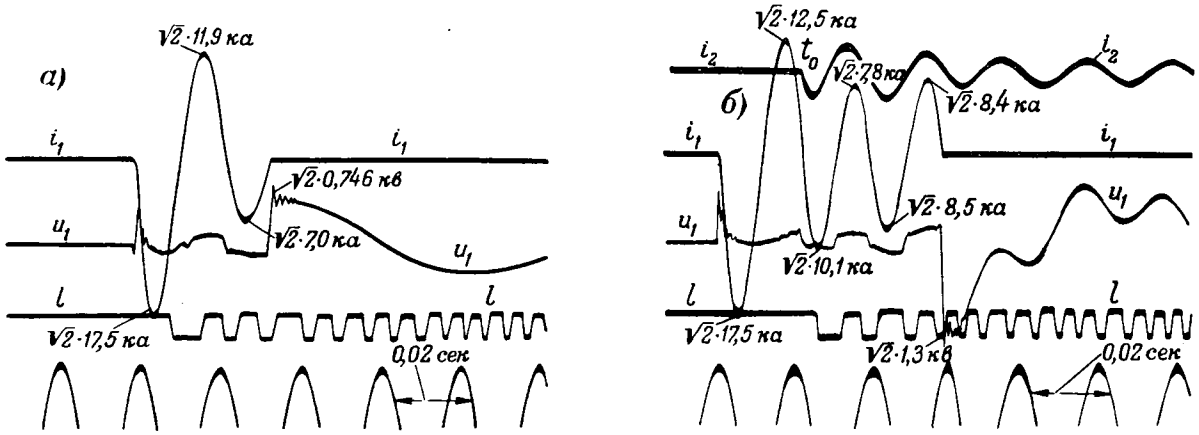


Рис. 7. Сравнительные осциллограммы испытания масляного выключателя в колебательном контуре (*а*) и в связанном колебательном контуре (*б*).

двухчастотном колебательных контурах. Для иллюстрации на рис. 6 и 7 приведены соответствующие осциллограммы, на каторых записаны: ток i_1 в испытательной цепи, ток i_2 в дополнительном контуре, напряжение U_1 на испытуемом выключателе и ступенчатая кривая l, регистрирующая ход траверзы.

На осциллограмме рис. 6,*а* записан ток в цепи колебательного контура при металлическом коротком замыкании, на рис. 6,*б* — кривая этого же тока, полученная при подключении к колебательному контуру дополнительного контура C_2—L_2 в момент t_0.

На рис. 7,*а*, *б* приведены две аналогичные сравнительные осциллограммы, полученные при испытании бакового масляного выключателя номинального напряжения 2,0 *кв* с простым разрывом.

Проведенные исследования показали, что схемы связанных колебательных контуров легко осуществимы и их эксплуатация мало чем отличается от эксплуатации обычного колебательного контура.

Заключение. 1. Использование для компенсации потерь в колебательном контуре синхронного генератора дает принципиальную возможность получить незатухающий испытательный ток длительное время, но требует установки дорогостоящего дополнительного оборудования.

2. При испытании современных высоковольтных аппаратов со значительным временем горения дуги возникает необходимость поддерживать незатухающий испытательный ток 3 ... 8 полупериода промышленной частоты. Это может быть достигнуто при проведении испытаний не на обычных одно- и двухчастотных колебательных контурах, а при использовании в них двух связанных контуров с индуктивной или емкостной связью.

3. При испытании аппаратов на мощность отключения, меньшую испытательной мощности колебательного контура, указанные схемы можно осуществить, используя основное оборудование самого колебательного контура и простейшие синхронизирующие устройства. Дополнительных затрат на осуществление схемы почти не потребуется.

Литература

1. А. А. Горев, В. В. Каплан и В. М. Нашатырь. Двухчастотный колебательный контур для испытания сверхмощных высоковольтных выключателей на отключающую способность. Электричество, № 6, 1951.

2. А. А. Горев. Авторское свидетельство № 79654. Устройство для испытания отключающих аппаратов на разрывную мощность.

3. В. В. Каплан и В. М. Нашатырь. Схема для одновременного включения нескольких контуров высокого напряжения. ЖТФ, вып. 5, 1949.

4. В. В. Каплан и В. М. Нашатырь. Схема электрического сдвига начала прохождения тока. Электричество, № 2, 1950.

[29. 1. 1952]

◇ ◇ ◇

ВОЛОГОДСКАЯ ОБЛАСТНАЯ БИБЛИОТЕКА

Принципы построения искусственных схем испытания дугогасящих устройств

Кандидат техн наук., доц. М. М. АКОДИС

Уральский политехнический институт

Приводится анализ влияния постоянных схемы на гашение дуги в выключателях и ионных вентилях и определяются требования к искусственным схемам их испытаний. В разрезе этих требований рассматривается пригодность предложенных искусственных схем, в том числе и схемы автора.

Разрывная мощность подавляющего большинства лабораторий разрывных мощностей при наиболее высоких напряжениях не превышает 1 млн. *ква*, что составляет 10 ... 20% разрывной мощности выключателей, применяемых в современных крупных энергосистемах. Исследование процесса дугогашения и испытания выключателей на полную разрывную мощность можно значительно облегчить применением искусственных схем с питанием выключателя током от источника пониженного напряжения и подачей восстанавливающегося на дуге напряжения от другого источника. Использование таких схем позволит без существенных затрат увеличить в несколько раз мощность лабораторий. Несмотря на многочисленные работы по искусственным схемам, проведенные за последние 15 лет за рубежом, удовлетворительные результаты до последнего времени не были получены [Л. 5].

В СССР эти вопросы были решены еще в 1939—1940 гг. [1], однако результаты исследований не были своевременно опубликованы в связи с военной обстановкой.

Автор показал [Л. 1], что в разрезе требований к искусственным схемам воспроизведения испытательной мощности и по характеру влияния параметров сети процессы гашения дуги в выключателях и ионных вентилях сходны.

На основе частично опубликованного анализа процесса дугогашения [Л. 2] автор сформулировал требования, которым должны удовлетворять искусственные схемы, и показал неполноценность разработанных ранее схем. Здесь будут описаны разработанные автором схемы, позволяющие полноценно воспроизводить условия натуральных схем испытания выключателей и ионных вентилей.

Процесс гашения дуги. Простейшая схема отключения короткого замыкания изображена на рис. 1,*а*. После гашения дуги шунтирующая выключатель емкость C заряжается, напряжение на ней, а следовательно, и на дуге растет, восстанавливается. Если в какой-либо момент оно превысит прочность дугового промежутка, произойдет пробой.

Как установил А. Я. Буйлов [Л. 3], пробой дугового промежутка восстанавливающимся напряжением еще не означает обязательного отказа в гашении, в ряде случаев разряд может быть подавлен. Рассмотрим факторы, определяющие развитие начального пробоя в силовую дугу.

После пробоя напряжение на дуговом промежутке снижается до ничтожной величины, следовательно, ионизация электрическим полем почти прекращается. В возникшей импульсной дуге происходит интенсивная ионизация разрядным током конденсатора C. Ток разряда быстро достигает больших значений благодаря очень высокой частоте колебательного контура: конденсатор C, выключатель, соединительные провода. Однако энергия конденсатора незначительна, поэтому ионизация кратковременна. От силовой цепи в первый момент может протекать лишь незначительный ток. Если пробой произошел вблизи амплитудного значения восстанавливающегося напряжения, мгновенное значение тока через индуктивность в момент пробоя близко к нулю. Когда пробой произойдет задолго до этого момента, тогда ток через индуктивность в момент пробоя может достигать десятков ампер в мощных высоковольтных сетях. Индуктивность ограничивает скорость нарастания этого тока, поэтому подвод энергии от генератора для ионизации промежутка в первый момент может быть незначительным. Таким образом, после разряда конденсатора C интенсивность ионизации может резко снизиться. Деионизация промежутка происходит довольно интенсивно даже в простом искровом промежутке, впервые пробиваемом этим разрядом. В современном выключателе, где пробиваемый промежуток в этот момент подвергается обдуванию струей газа с большой скоростью, деионизация происходит чрезвычайно интенсивно. Если после разряда конденсатора C ионизация то-

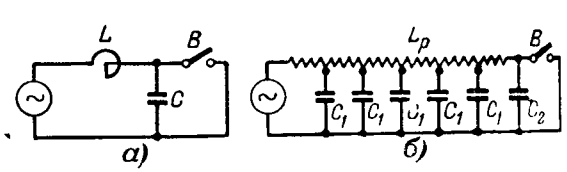


Рис. 1. Схема отключения короткого замыкания.
а — цепь с сосредоточенными параметрами (короткое замыкание за реактором); *б* — с распределенными параметрами (короткое замыкание за трансформатором).

[1] Авторское свидетельство на искусственные схемы № 86166 от 25/III 1940 г.

ком от генератора окажется недостаточной для того, чтобы компенсировать его деионизацию, прочность промежутка начнет нарастать, напряжение может снова восстановиться.

Из сказанного следует, что вероятность перехода первичного импульсного разряда от конденсатора C в силовую дугу будет тем больше, чем меньше индуктивность цепи восстановления напряжения [Л. 2], т. е. чем больше возможная скорость нарастания тока через дугу. При неизменной индуктивности цепи восстановления напряжения вероятность развития импульсного разряда в силовую дугу будет тем выше, чем больше емкость C.

При пробое в момент амплитудного значения восстанавливающегося напряжения, когда ток высокочастотных колебаний близок к нулю, вероятность развития начального импульсного разряда в силовую дугу иногда может оказаться меньше, чем при пробое в момент, когда ток высокочастотных колебаний близок к амплитудному значению. К моменту пробоя энергия, накопленная в конденсаторе, во втором случае меньше. Однако немедленно после пробоя ток через дуговой промежуток может достигнуть значений, до которых нарастал бы десятки микросекунд при пробое на амплитудном значении восстанавливающегося напряжения.

На основании изложенного можно утверждать, что главным фактором, определяющим гашение, является скорость подвода энергии к дуге, которая обусловлена скоростью нарастания тока в схеме, иначе говоря, в основном [2] реактивностью цепи восстанавливающегося напряжения.

У большинства выключателей остаточная проводимость дугового промежутка после достижения нулевого значения тока при больших скоростях восстановления напряжения сети достаточно велика [Л. 3] для того, чтобы заметно влиять на скорость восстановления. Очевидно, в этом случае после достижения нулевого значения через дугу начинает протекать ток противоположной полярности. Вследствие этого в период восстановления напряжения подвод энергии в дуге, определяющий интенсивность ее ионизации, будет зависеть не только от напряженности поля, но и от значения тока через дуговой промежуток в этот момент. Скорость нарастания тока в цепи зависит от реактивности цепи восстанавливающегося напряжения, а скорость восстановления напряжения определяется отношением этой реактивности к сопротивлению дугового промежутка, следовательно, влияние реактивности цепи на гашение дуги будет еще более непосредственным.

Если скорость нарастания энергии, подводимой от источника, будет достаточна, чтобы обеспечить компенсацию рассеяния энергии, обусловленного деионизирующим действием дугогасительной системы выключателя, то дуга начнет развиваться и восстанавливаться, в противном случае она погаснет.

При определенном напряжении реактивность цепи восстанавливающегося напряжения определяется мощностью короткого замыкания. Казалось бы, условия гашения дуги в натуральной схеме во всех случаях должны однозначно определяться отключаемым током, напряжением и емкостью C, как это обычно и полагают. Однако легко показать, что и для натуральной схемы это не всегда справедливо.

Рассмотрим схемы, изображенные на рис. 1. В схеме рис. 1,*а* короткое замыкание происходит на зажимах реактора, а в схеме рис. 1,*б* — на зажимах трансформатора. Предположим, что мощность короткого замыкания, напряжение и собственная скорость восстановления напряжения сети (без учета остаточной проводимости дугового промежутка) в обоих случаях одинаковы. Собственная емкость реактора очень мала, и в схеме *а* скорость восстановления напряжения, равная скорости в схеме *б*, достигается за счет сосредоточенной емкости C. В схеме *а* после пробоя на дуговой промежуток разряжается вся энергия конденсатора C, что может создать ионизацию, достаточную для дальнейшего развития дуги.

В схеме *б* после пробоя в первый момент на промежуток может разрядиться лишь незначительная часть емкости, непосредственно примыкающая к выключателю. Энергия остальных емкостей может подводиться к дуговому промежутку лишь постепенно, по мере нарастания тока через индуктивность, отделяющую распределенную емкость от выключателя. В результате ионизация дугового промежутка после пробоя будет значительно слабее и может оказаться недостаточной для дальнейшего развития дуги. При наличии остаточной проводимости дугового промежутка после нулевого значения тока восстановление напряжения в схемах *а* и *б* (рис. 1) происходит различно, следовательно, и вероятность первичного пробоя будет неодинакова.

Осциллограммы *в* и *г* рис. 2 изображают опыты отключения тока 800 *а* при напряжении 110 *кв*. Ток ограничивался двумя последовательно включенными однофазными трансформаторами, используемыми как реакторы (вторичные обмотки закорочены, рис. 2,*а*). Восстановление напряжения сопровождается многократными подавленными разрядами, причиной которых, видимо, являются большая индуктивность цепи и распределенность основной емкости вдоль обмотки.

Характерны испытания того же выключателя при параллельном включении обоих трансформаторов по рис. 2,*б*. Для ограничения тока до 1 800 *а* одна из двух вторичных обмоток разомкнута. Частота восстанавливающегося напряжения при этом мало изменилась, однако в этих опытах уже не наблюдалось подавленных разрядов при восстановлении напряжения. Возникновение пробоя приводило к восстановлению дуги.

При испытаниях на большие токи, когда индуктивность была значительно меньше, а емкость, шунтирующая выключатель, больше, повторных пробоев на восстанавливающемся напряжении уже не наблюдалось.

[2] Как видно, процесс аналогичен переходу грозового перекрытия в короткое замыкание системы [Л. 4].

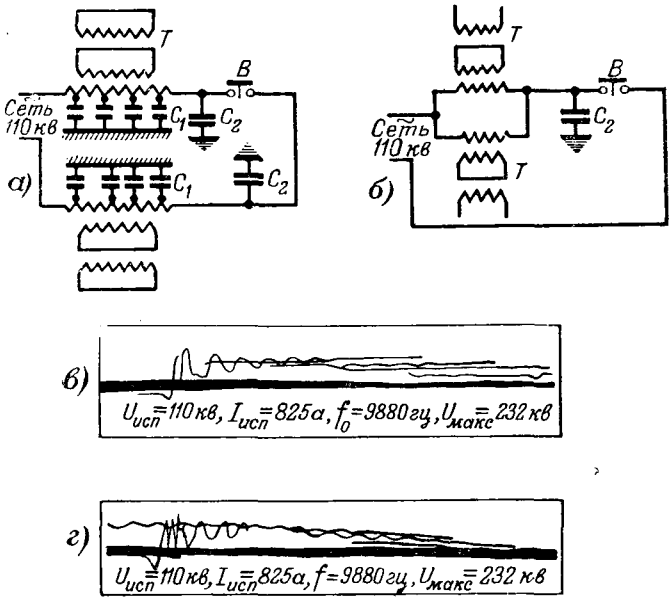


Рис. 2, *а* и *б* — схемы испытания выключателей; *в*, *г* — осциллограммы.

C_1 — емкость обмотки; C_2 — внешняя емкость; *T* — трансформатор; *B* — выключатель.

Подавленных разрядов в этих гасительных устройствах при больших токах не наблюдалось даже при испытаниях на пониженном напряжении (6...10 *кв* и 20...10 *ка*), хотя частота восстанавливающегося напряжения при этом была в несколько раз выше, и низкое напряжение, предопределяя малый запас энергии в емкостях, создавало благоприятные условия для подавленных разрядов. Малая индуктивность цепи, допускающая быстрый подвод энергии от источника тока, очевидно, обусловливала зажигание и установление дуги после каждого пробоя.

Различные условия развития начального импульсного пробоя в дугу при одинаковой скорости восстановления напряжения могут иметь место и при малой скорости восстановления напряжения, определяемой большой емкостью, подключенной к выключателю. Если параллельно выключателю подключена разветвленная кабельная сеть, состоящая из сравнительно коротких кабельных линий, можно считать ее концентрированной емкостью. Если подключить слабо разветвленную воздушную сеть (длинные линии), то получим распределенную емкость, отделенную от выключателя индуктивностью линий. При равной собственной скорости восстановления напряжения сети вероятность развития первичного пробоя в силовую дугу может быть различной в обоих случаях.

Нельзя утверждать, что при подключении распределенной емкости вероятность развития дуги будет всегда меньше, чем при подключении сосредоточенной емкости. Если ток, протекающий через дуговой промежуток из распределенной емкости, достаточен для поддержания разряда после первичного пробоя, то может оказаться, что вероятность восстановления дуги будет выше, чем при сосредоточенной емкости. При равной скорости восстановления напряжения величина емкости в цепи с распределенными постоянными значительно больше, чем в цепи с сосредоточенными постоянными, следовательно, запас энергии в ней больше. Длительность протекания разрядного тока емкости позволяет достигнуть большего значения основного тока к моменту прекращения разрядного тока емкости.

При наличии остаточной проводимости дугового промежутка после достижения нулевого значения тока кривая восстановления напряжения будет по-разному искажаться в обеих схемах, следовательно, и вероятность первичного импульсного разряда также будет неодинакова.

При испытаниях в искусственных схемах реактивность цепи восстанавливающегося напряжения может очень сильно отличаться от реактивности натуральной схемы при том же токе. Вследствие этого при равных отключаемых токах, равных амплитудах напряжений и собственных частотах схем (т. е. равных собственных скоростях восстановления напряжения схем) условия гашения дуги в искусственных схемах могут совершенно не соответствовать условиям гашения дуги в натуральной схеме на полную мощность.

Все известные искусственные схемы испытания дугогасящих устройств, разработанные ранее, не учитывают указанных факторов, что делает их неполноценными, не позволяющими имитировать испытания в натуральной схеме — на полную мощность.

На роль индуктивности цепи восстанавливающегося напряжения как основного фактора, определяющего способность контура зажечь дугу, и как основного критерия, определяющего применимость и полноценность искусственных схем для испытания дугогасящих устройств, автор указал в 1939 г. [Л. 2].

Анализ применяемых искусственных схем испытания. По принципу действия все предложенные ранее схемы могут быть разбиты на 2 группы: трансформаторные и импульсные.

Трансформаторные схемы. Трансформаторные схемы рис. 3 и 4 для испытания ионных вентилей начали применять в 1932 г., для испытания выключателей — в 1935 г.

На рис. 3 : *I* — источник большого тока с пониженным против номинального для испытуемого аппарата напряжением; *II* — трансформатор, подающий высокое напряжение нужной величины в середину между двумя испытываемыми аппаратами.

Как следует из докладов на Парижской конференции по сетям высокого напряжения в 1948 г., эта же схема до сих пор широко применяется в ряде стран [Л. 5, 9].

Эта схема оказалась непригодной для испытания дугогасящих устройств: чрезвычайно большая индуктивность цепи восстановления напряжения в схеме резко облегчает гашение дуги. В результате условия гашения дуги, существующие в натуральной схеме, не воспроизводятся, так как энергия, подводимая от цепи восстановления, мала по сравнению с энергией, подводимой

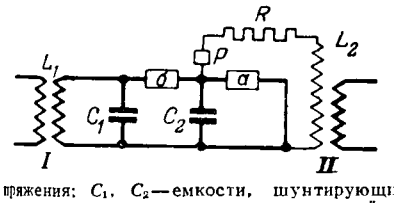


Рис. 3. Трансформаторная схема испытания выключателей.

а и *б*—испытуемый и вспомогательный выключатели; L_1—индуктивность токового контура; L_2—индуктивность цепи восстанавливающегося напряжения; C_1, C_2—емкости, шунтирующие аппараты; *P*—разделительное устройство.

к дуге в натуральной схеме. Достаточно наличия незначительной остаточной проводимости дугового промежутка в испытуемом или вспомогательном выключателях, не оказывающей сколько-нибудь существенного влияния на скорость восстановления напряжения в натуральной цепи, чтобы в данной схеме снизить скорость во много раз. Если напряжение и достигнет величины, достаточной для пробоя дугового промежутка, то сомнительно, чтобы в сколько-нибудь эффективном дугогасящем устройстве начальный импульсный разряд мог развиться в дугу [Л. 2].

Для изучения вероятности обратных зажиганий в выпрямителях схема еще менее пригодна, так как, кроме перечисленных здесь и в упомянутой работе [Л. 2] недостатков, добавляются еще следующие:

1. В таком виде схема не позволяет правильно воспроизводить кривую тока через вентиль в период коммутации, который имитируется срабатыванием отсекающего вентиля B_4 (рис. 4,*б*). Изменение тока в испытуемом вентиле с момента срабатывания вентиля B_4 в основном определяется индуктивностью цепи вентилей B_1, B_2, B_4 и падением напряжения в вентилях B_1, B_2, которое в период гашения может быть весьма различным. Между тем правильное воспроизведение формы кривой тока в период, предшествующий гашению дуги, необходимо для верного воспроизведения процесса гашения.

Для ртутных выпрямителей схема вовсе непригодна, так как восстанавливающееся напряжение, будучи обратным для испытуемого вентиля, является для второго (защитного) вентиля прямым, между тем прочность в прямом направлении в ртутном выпрямителе восстанавливается значительно медленнее, чем вентильная, следовательно, в этой схеме (рис. 4) нельзя определить вентильную прочность.

Все аналогичные схемы испытаний, названные трансформаторными, в которых восстанавливающееся напряжение подается на испытуемый аппарат через повысительный трансформатор от источника напряжения промышленной частоты, не могут воспроизводить условий испытаний дугогасящих устройств в натуральной схеме на полную мощность.

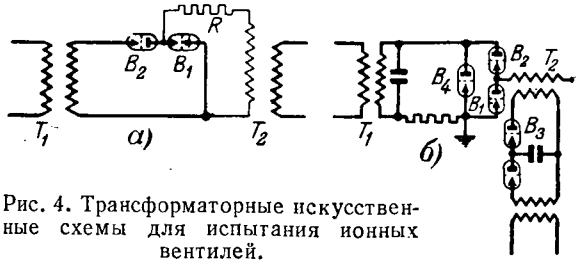


Рис. 4. Трансформаторные искусственные схемы для испытания ионных вентилей.

Импульсные схемы. Примерно с 1938 г. для испытания выключателей и вентилей начали применять импульсные схемы (рис. 5), в которых высокое напряжение на выключатель после прекращения тока подавалось от заряженных конденсаторов[3] [Л. 6. 7].

В подобных схемах может быть обеспечен очень быстрый подвод энергии к выключателю после прекращения тока в дуге, так как индуктивность цепи восстанавливающегося напряжения

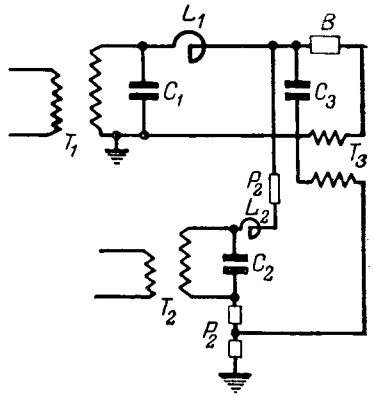


Рис. 5. Импульсная схема испытания выключателей.

T_2—трансформатор, заряжающий конденсатор цепи восстанавливающегося напряжения; T_3—синхронизирующий трансформатор; P_2—разделительные промежутки; C_3—емкость, шунтирующая выключатель.

можно взять достаточно малой. Однако и в импульсной схеме подвод энергии не может быть сделан таким же, как и в натуральной схеме на полную мощность.

Для того чтобы в этой схеме повышенное напряжение не воздействовало на генератор (источник тока), необходимо его защитить высоковольтным реактором L_1 и емкостью (рис. 5). Индуктивность реактора L_1 должна быть значительно меньше индуктивности цепи тока, в противном случае он чрезмерно снизит ее мощность. Для того чтобы после пробоя разделительного промежутка P_2 (рис. 5) напряжение на дугогасящем устройстве могло нарастать до больших значений, индуктивность L_2 должна быть значительно меньше L_1.

Индуктивность цепи тока L_1 в этой схеме значительно меньше, чем в натуральной, где тот же ток получается при полном напряжении. Очевидно, индуктивность L_2 будет в десятки (а при большей кратности увеличения напряжения и в сотни) раз меньше, чем индуктивность в натуральной схеме. Емкость C_3, шунтирующая дугогасящее устройство, должна быть поэтому во столько же раз больше емкости натуральной схемы при той же скорости восстановления напряжения.

В результате условия гашения дуги в этой схеме получаются значительно более жесткими, чем в натуральной при равной скорости восстановления напряжения. Кроме того, восстанавливающееся напряжение может воздействовать в этой схеме на дугогасящее устройство лишь незначительную часть полупериода, так как конденсатор *C* быстро разряжается на индуктивность L_1, что также делает испытания неполноценными.

[3] М. М. Акодис. Авторское свидетельство № 570012 с приоритетом от 23 III 1938 г., Бюллетень изобретений, № 4, 1940.

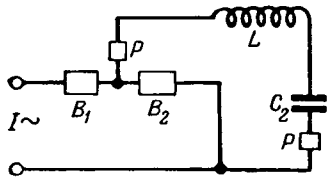


Рис. 6. Полноценная искусственная схема.

B_1, B_2 — испытуемый и защитный аппараты; C_2 — конденсатор цепи восстанавливающегося напряжения; L — индуктивность цепи восстанавливающегося напряжения; P — разделительные и синхронизирующие устройства; I — цепь испытательного тока.

Малая величина L_2 затрудняет получение не только малых, но и умеренных скоростей восстановления напряжения в этой схеме, требуя применения очень больших емкостей и большой мощности зарядной цепи, что повышает стоимость схемы.

Для испытания ионных вентилей эта схема еще менее пригодна, хотя и применялась [Л. 8]. В ионном вентиле гашение дуги происходит не эпизодически, а непрерывно 4 320 000 раз в сутки. Изучение процесса дугогашения (вероятности обратных зажиганий) должно проводиться значительно тщательнее, чем в выключателе. Поэтому схема, создающая условия, столь отличные от натуральных, неприемлема.

Невозможность воспроизвести кривую обратного напряжения в течение всего непроводящего полупериода также является крупным дефектом и в применении к ионным вентилям, так как во многих типах вентилей обратные зажигания возможны в продолжение почти всего непроводящего периода.

«Жесткость» подобной схемы, т. е. способность быстрого подвода большого количества энергии к дуговому промежутку, обеспечивающего надежное его зажигание, делает схему весьма удобной для применения только с целью продления времени горения дуги при испытании выключателей. Подавая волну напряжения немедленно после того, как ток достигнет нулевого значения или до этого момента, при достаточной величине C_2 можно обеспечить необходимое удлинение времени горения дуги даже при напряжении емкости, равном напряжению цепи тока (что освобождает от необходимости защищать цепь тока от высоких напряжений).

Эта схема может использоваться как приспособление для обеспечения необходимой длительности горения дуги в полноценной схеме испытаний, предложенной автором в 1940 г.[1] (рис. 6).

Основной отличительной особенностью схемы рис. 6 является то, что в ней «с целью обеспечения возможности выполнения индуктивности цепи высокого напряжения равной индуктивности естественной цепи короткого замыкания на полную мощность, высокое напряжение подается от заряженных конденсаторов в точку соединения двух последовательно включенных выключателей» [4].

[4] Извлечение из авторского свидетельства № 86166 от 25/III 1940 г.

В этой схеме в отличие от всех ранее рассмотренных индуктивность цепи восстанавливающегося напряжения и емкость, шунтирующая дугогасящее устройство, не зависят от параметров цепи испытательного тока. Вследствие этого схема позволяет сделать мощность цепи восстанавливающегося напряжения равной полной испытательной мощности, без чего, как было показано выше, нельзя обеспечить полноценные испытания выключателей. Схема обеспечивает также достаточную длительность воздействия обратного напряжения.

Преимуществом рассматриваемой схемы является также незначительная стоимость цепи восстанавливающегося напряжения, что, видимо, явилось основной причиной ее применения за границей в 1948 г. [Л. 9], поскольку там предлагалось регулировать скорость восстановления напряжения изменением индуктивности.

Очевидно, полноценная схема испытания ионных вентилей также может строиться только на этом принципе.

Разумеется, одного решения вопроса о принципах построения искусственных схем, полноценно воспроизводящих работу дугогасящих устройств в цепи полной мощности, еще недостаточно для обеспечения возможности их испытания на установках, выполненных по искусственным схемам.

Применительно к выключателям важнейшей проблемой, без решения которой невозможно использование искусственных схем, является синхронизация контуров, также успешно решенная в Советском Союзе [Л. 6, 10], особенно удачное и оригинальное выполнение которой дано Н. М. Чернышевым (ВЭИ).

Литература

1. М. М. Акодис. Нарастание обратного напряжения в схемах с ионными вентилями. Электричество, № 6, 1950.

2. М. М. Акодис. О гашении дуги при наличии импульсного дутья. Электричество, № 12, 1939.

3. А. Я. Буйлов. К теории гашения дуги переменного тока. Электричество, № 1, 1936.

4. М. М. Акодис. Развитие грозового разряда в силовую дугу и методы его изучения. Электричество, № 3, 1941.

5. E. Fogelsanger. Indirect Tests on Circuit—Breakers. Доклад № 122 на международной конференции по высоковольтным сетям. Париж, 1948.

6. М. М. Акодис. Искусственное увеличение разрывной мощности установок для испытания выключателей. Электричество, № 5, 1940.

7. J. Biermanns. Fortschrite im Bau von Druckgasshalfern, ETZ, № 8, 1938.

8. Н. Н. Петухов. Об обратных зажиганиях в ртутных выпрямителях. ЖТФ, вып. 3, т. XI, 1941.

9. A. Blaha. Contribution to indirect tests of Circuits breakers. Доклад на международной конференции по высоковольтным сетям. Париж, 1948.

10. Н. М. Чернышев. Схема синхронизации для испытания высоковольтных выключателей в искусственном режиме, Электричество, № 4, 1950.

[9. 4. 1951]

◇ ◇ ◇

Подмагничивание трансформаторов тока нулевой последовательности

Кандидат техн. наук И. М. СИРОТА

Институт электротехники Академии наук УССР

Дан приближенный инженерный метод расчета трансформаторов тока нулевой последовательности с подмагничиванием. Показано, что подмагничивание позволяет осуществить надежную высокочувствительную защиту от замыканий на землю генераторов и других элементов энергосистем.

С начала 30-х годов применяется иногда подмагничивание переменным током сердечников измерительных трансформаторов тока с целью уменьшения их погрешностей. Сейчас стали широко внедрять подмагничивание трансформаторов тока нулевой последовательности для защиты статорных обмоток генераторов [Л. 1]. Подмагничивание сердечников позволило значительно повысить мощность трансформаторов и ограничить первичные токи небаланса, возникающие от пространственной несимметрии магнитных потоков и от посторонних магнитных полей [Л. 2]. Тем самым была практически решена задача отстройки от токов небаланса и осуществлена на многих электростанциях достаточно чувствительная токовая защита от замыканий на землю.

Принцип устройства трансформаторов тока нулевой последовательности с подмагничиванием описан, в частности, в [Л. 2]. В схеме защиты наиболее удобно и просто подмагничивание осуществляется током частоты 50 *гц*.

Анализ и испытания показали, что физический процесс в трансформаторах тока с подмагничиванием отличается сильно выраженной нелинейностью.

Осциллограммы э. д. с. E и вторичного тока I_2 сильно искажены, и часто амплитуды третьей и первой гармоник почти одинаковы. Форма кривых E и I_2 и их действующие значения существенно зависят от тока подмагничивания I_μ и угла сдвига фаз δ между этим током и первичным током замыкания на землю $I_з$. Форма кривой тока подмагничивания I_μ не имеет практического значения.

Решение дифференциальных уравнений, описывающих процесс в трансформаторах тока с подмагничиванием, даже при условии некоторых допустимых упрощений представляет большие трудности, в частности, ввиду необходимости вводить в уравнения аналитические выражения гистерезисных циклов намагничивания. Громоздкость и сложность получаемых результатов ставят под сомнение целесообразность применения аналитических решений для инженерного расчета. Вместе с тем едва ли такое сложное решение может расширить физическое представление о рабочем процессе трансформатора тока с подмагничиванием. Ниже предлагается упрощенный метод расчета.

Метод расчета. Для простоты принимаем, что обмотки трансформатора имеют по одному витку.

В предлагаемом методе расчета используется аналитическая зависимость сопротивления холостого хода Z_δ от сдвига фаз δ_0 между током I_μ и намагничивающей составляющей первичного тока $I_{з0}$, выведенная при следующем формальном допущении: все токи, магнитные потоки и э. д. с. синусоидальны, причем удвоенная э. д. с. каждого сердечника связана с его н. с. вольтамперной характеристикой [1] (рис. 2). Законность данного допущения, необходимые коррективы, вносимые в окончательное уравнение Z_δ, погрешность и область применения метода устанавливаются далее на основании экспериментальных данных, но не подкрепляются аналитическими соображениями. Это обстоятельство ограничивает значение выведенной ниже зависимости и заставляет считать основанный на ней метод расчета полуэмпирическим.

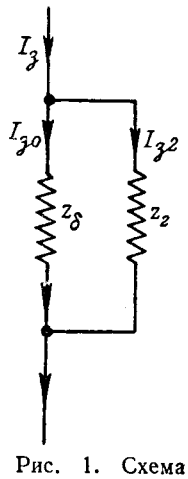


Рис. 1. Схема замещения трансформатора тока нулевой последовательности.

В схеме замещения (рис. 1) Z_δ включено параллельно сопротивлению Z_2. Полное сопротивление Z_2 содержит: сопротивление реле и соединительных проводов, активное сопротивление вторичной обмотки и ее сопротивление рассеяния. Сопротивление Z_δ является основным параметром трансформатора тока, определяющим чувствительность защиты.

При принятом выше допущении можно, использовав вспомогательное построение (рис. 2), представить н. с. трансформатора в виде векторной диаграммы (рис. 3).

---

[1] В интересующих нас пределах эта характеристика практически не зависит от того, получена ли она при синусоидальном токе или при синусоидальном напряжении.

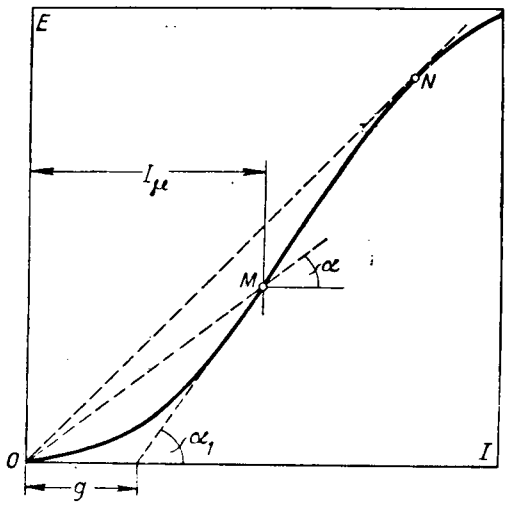


Рис. 2.

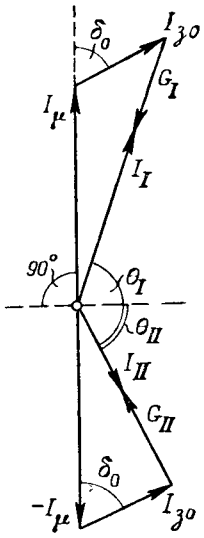


Рис. 3. Векторная диаграмма намагничивающих сил трансформатора тока нулевой последовательности.

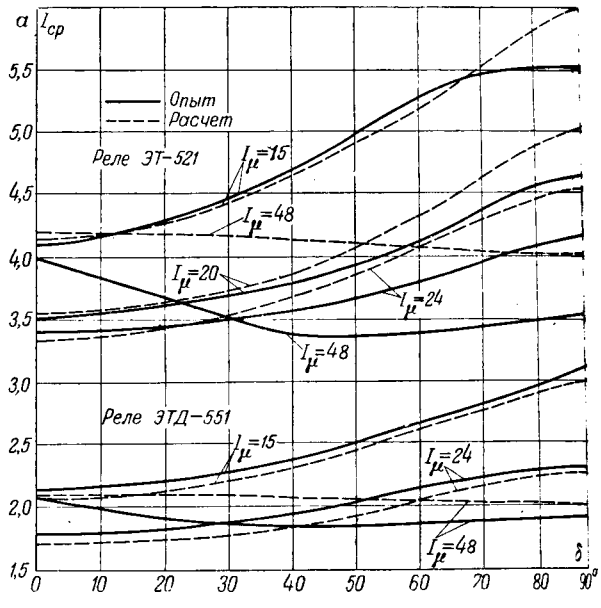


Рис. 4. Кривые чувствительности трансформатора ТНП-4 с реле ЭТ-521 (уставка $I_{ср\,2}=2$ *а*) и ЭТД-551 (уставка $I_{ср\,2}=1$ *а*).

На основании рис. 2 и 3 в приложении выведено следующее выражение для сопротивления:

$$z_\delta = \sqrt{\operatorname{tg}^2\alpha\cdot\sin^2\delta_0+\operatorname{tg}^2\alpha_1\cos^2\delta_0}, \qquad (1)$$

здесь α — угол наклона прямой, соединяющей рабочую точку вольтамперной характеристики трансформатора M с началом координат;

α_1 — угол наклона касательной, проведенной к характеристике в той же точке (рис. 2).

В частном случае при $\delta_0=0$ $z_\delta=z_0=\operatorname{tg}\alpha_1$, а при $\delta_0=90°$ $z_{90}=\operatorname{tg}\alpha$. Очевидно, z_δ не зависит от знака угла δ_0.

При расположении точки M (рис. 2) на среднем участке характеристики $Z_0>Z_{90}$. Если же совместить точку M с точкой перегиба характеристики N, то сопротивление не будет зависеть от угла $\delta_0(Z_\delta=Z_0)$.

Зная сопротивление Z_δ, угол потерь в стали γ и параметры вторичной цепи Z_2 и ψ и задавшись приведенным вторичным током срабатывания реле $I_{ср2}$, нетрудно на основании схемы (рис. 1) рассчитать чувствительность по первичному току:

$$I_{ср}=I_{ср2}\sqrt{\left(\frac{z_2}{z_\delta}\right)^2+2\frac{z_2}{z_\delta}\sin(\gamma+\psi)+1}. \qquad (2)$$

Если задан не вторичный ток, а мощность срабатывания реле $P_{ср2}$, то

$$I_{ср}=\sqrt{P_{ср2}\left[\frac{z_2}{z_\delta^2}+\frac{2\sin(\gamma+\psi)}{z_\delta}+\frac{1}{z_2}\right]}. \qquad (3)$$

Для выяснения возможных погрешностей уравнений (1), (2) и (3) был проведен ряд испытаний на нескольких трансформаторах разных типов. Испытания показали, что в случае активно-индуктивной нагрузки, представляющей наибольший практический интерес, расчет на основании уравнений (1), (2) и (3) вполне допустим (с точностью до 20%) при изменении z_2 в широких пределах — от $z_2=0$ до примерно $z_2=15z_\delta$. Однако при этом следует подставлять в уравнение (1) вместо угла δ_0 между токами I_μ и $I_{3.0}$ угол δ между I_μ и током замыкания на землю $I_з$. В качестве угла γ принимается угол потерь в стали, соответствующий н. с. I_μ.

Для иллюстрации на рис. 4 представлены расчетные и опытные кривые тока $I_{ср}=f(\delta, I_\mu)$, полученные на одном трансформаторе на 4 кабеля с реле типа ЭТ-521 (уставка $I_{ср2}=2$ *а*; $P_{ср2}=0{,}1$ *ва*; $\psi\approx 67°$).

На рис. 5 даны кривые $I_{ср}=f(\delta;\ Z_2)$ для трансформатора на 7 кабелей при номинальном подмагничивании (см. далее) и в зависимости от сопротивления реле z_2, изменяемом за счет числа витков вторичной обмотки.

Кривые рис. 4 и 5 были рассчитаны по предварительно снятым вольтамперным характеристикам и кривым углов потерь в стали.

При активной нагрузке, например при включении реле через выпрямители, расчет с той же точностью, что и выше, возможен только тогда, когда $R_2\leqslant z_0$ (значения углов δ и γ — указанные). При $R_2>z_0$ иногда получается положительная погрешность в токе $I_{ср}$ порядка 60...70%. Значительно бо́льшая погрешность при любом z_2 получается при наличии в схеме емкости, компенсирующей индуктивность реле и трансформатора тока (опережающий угол $\psi\geqslant 0$). В этих условиях чувствительность, а также оптимальную емкость конденсаторов следует определять экспериментально. Однако при реле типа ЭТД-551 со встроенным конденсатором, частично компенсирующем индуктивность реле (отстающий

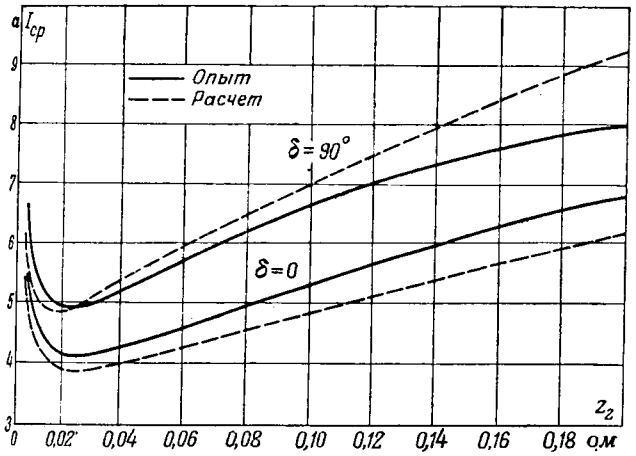


Рис. 5. Кривые чувствительности трансформатора ТНП-7 с реле ЭТ-521 (уставка $P_{ср2}=0{,}1$ *ва*).

угол $\psi \approx 45°$), возможен довольно точный расчет, если принять условно $\psi+\gamma=90°$. Для иллюстрации на рис. 4 представлены соответствующие расчетные и экспериментальные кривые при уставке реле ЭТД-551, равной $I_{ср2}=1$ *а* и $P_{ср2}=0{,}023$ *ва*.

Практический расчет трансформатора в указанных выше случаях, когда погрешности не выходят за допустимые пределы, производится на основании вольтамперных характеристик стали, отнесенных к единичным размерам: один виток на 1 $см^2$ поперечного сечения сердечника и 1 *см* силовой линии сердечника (рис. 6).

Выбрав удельную э. д. с. E'_{μ} и ампервитки подмагничивания I'_{μ}, определяем удельное сопротивление холостого хода для худшего случая $\delta=90°$:

$$Z'_{90}=\frac{E'_{\mu}}{I'_{\mu}}.$$

При рекомендуемой шихтовке сердечника через одну пластину воздушные зазоры в стыках практически не влияют на магнитное сопротивление трансформатора.

Задавшись действительным поперечным сечением двух сердечников и средней длиной магнитной линии l, находим сопротивление холостого хода

$$Z_{\delta}=Z_{90}=\frac{F}{l}Z'_{90}. \qquad (4)$$

Далее, нетрудно по формулам (2) или (3) рассчитать чувствительность защиты.

Наибольшая чувствительность достигается при равенстве абсолютных значений сопротивлений $z_2=z_{90}$. Тогда при активно-индуктивной нагрузке, положив с некоторым запасом $\psi+\gamma=90°$, находим располагаемую мощность

$$P_2 \approx \frac{I_3^2 Z_{90}}{4} \qquad (5)$$

и первичный ток срабатывания

$$I_{ср} \approx 2\sqrt{\frac{P_{ср2}}{z_{90}}}. \qquad (6)$$

При заданных $I_{ср}$ и $P_{ср2}$ необходимое отношение основных размеров

$$\frac{F}{l} \approx \frac{4P_{ср2}}{I_{ср}^2 z_{90}}. \qquad (7)$$

Мощность, расходуемая на подмагничивание:

$$P_{\mu}=P'_{\mu}Fl=E'_{\mu}I'_{\mu}Fl\ [ва]. \qquad (8)$$

Приведенное к одному витку напряжение подмагничивания

$$U_{\mu} \approx E'_{\mu}F. \qquad (9)$$

Эффект подмагничивания. Из предыдущего раздела видно, что наибольшее сопротивление холостого хода при $\delta=90°$ получается, если рабочей точкой характеристики будет точка перегиба *N* (рис. 2). Однако опыт показывает, что в этих условиях несколько затруднено снижение токов небаланса от подмагничивания. Учитывая, кроме того, вероятность различных углов δ при однофазных замыканиях на землю в энергосистеме, целесообразно принять меньшую индукцию подмагничивания, расположив рабочую точку *M* в средней, наиболее наклонной части характеристики. При таком выборе несколько понижается чувствительность при $\delta=90°$, но достигается наибольшая чувствительность при $\delta=0°$, и согласно (2) сопротивление Z_{δ} и чувствительность при большинстве других значений δ возрастают.

На рис. 6 представлены „единичные" вольтамперные характеристики для трансформаторных сталей марок Э4А, Э4АА, холоднокатанной стали

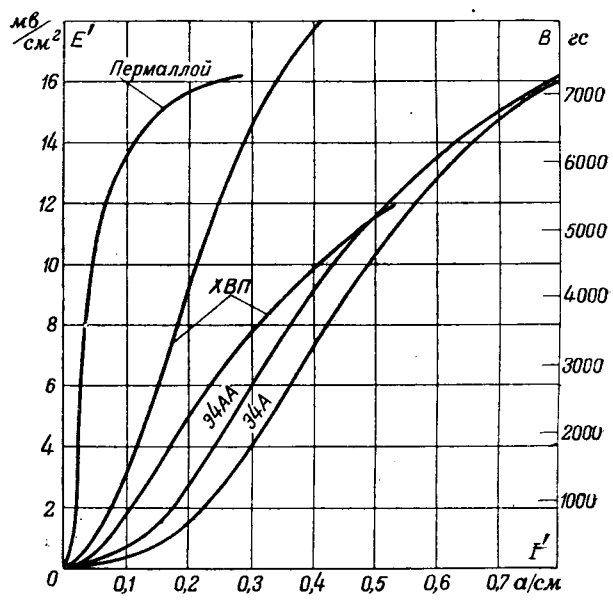


Рис. 6. Кривые намагничивания переменным током 50 *гц* трансформаторных сталей и пермаллоя (*I'*—эффективное значение).

ХВП (без рафинирующего отжига), а также для молибденового пермаллоя.

Для стали ХВП даны две кривые, примерно соответствующие двум крайним случаям: 1) направление магнитного потока у стыков между пластинами шихтованного сердечника, наиболее неблагоприятное; 2) сердечник — ленточный.

В выпускаемых в настоящее время трансформаторах с сердечниками из стали Э4А или Э4АА $E'_{\mu} \approx 7$ *мв/см²* и $B_{\mu} = 3200$ *гс*. Соответствующие этим значениям z_{90} и эквивалентная магнитная проницаемость μ_{90} (рис. 6) даны в табл. 1.

В таблице также приведены Z'_{90} и μ_{90} для стали ХВП при $E'_{\mu} = 4{,}4$ и $B_{\mu} \approx 2000$ *гс*.

Таблица 1

Материал	Без подмагничивания		С подмагничиванием	
	z', *ом*	μ, *гс/эр*	z'_{90}, *ом*	μ_{90}, *гс/эр*
Сталь Э4А . . .	0,0019	480	0,0175	4 450
Сталь Э4АА . . .	0,0039	1 000	0,021	5 300
Сталь ХВП (шихтованный сердечник при наибольшем влиянии стыков) . .	0,0055	1 400	0,024	6 100
Сталь ХВП (ленточный сердечник)	0,0079	2 000	0,037	9 400
Пермаллой молибденовый	0,059	15 000	—	—

Действующая проницаемость материала определяет два основных параметра трансформатора: первичный ток небаланса от несимметрии магнитных полей $I_{нб}$ и вес сердечника. При заданных размерах трансформатора и прочих равных условиях ток $I_{нб}$ обратно пропорционален μ [Л. 2]. При заданных чувствительности защиты, размерах окна и ширине листов вес сердечника также обратно пропорционален μ. В этих условиях можно ориентировочно считать ток небаланса обратно пропорциональным $\sqrt{\mu}$.

Сравнивая, например, параметры ленточного трансформатора без подмагничивания из стали ХВП и трансформаторов с подмагничиванием из сталей Э4АА и ХВП и пренебрегая различием углов γ, находим согласно табл. 1 соотношение их весов

$$100 : 37{,}7 : 21{,}3$$

и соотношение первичных токов небаланса

$$100 : 61{,}5 : 46.$$

Значительное снижение веса сердечников или повышение чувствительности, достигаемое подмагничиванием, оказывается решающим для конструирования крупных трансформаторов.

Для иллюстрации в табл. 2 приведены веса стали и чувствительность при $\delta = 90°$ трансформаторов тока с подмагничиванием: кабельных из стали Э4АА, охватывающих 7 и 12 кабелей (типа ТНП-7 и ТНП-12), и шинных с номинальным током 1 750 и 4 500 *а* (типа ТНПШ-1 и ТНПШ-3) при их изготовлении из стали ХВП. В той же таблице приведен вес сердечников этих же трансформаторов без подмагничивания в случае их изготовления из стали ХВП, а также для сравнения — из пермаллоя.

Для единообразия потребление вторичной цепи во всех случаях принято $P_{ср2} = 0{,}02$ *ва*, чувствительность для кабельных трансформаторов $I_{ср} = 2{,}2$ *а*, для шинных $I_{ср} = 2{,}6$ *а*. Для стали ХВП приняты, как наиболее вероятные, средние значения проницаемости между указанными в табл. 1, а именно: $\mu_{90} = 7750$ и $\mu = 1700$.

Из табл. 2 видно, что при заданных небольших $P_{ср2}$ и $I_{ср}$, часто требуемых на практике в системах с малым емкостным током замыкания на землю, получаются вполне приемлемые веса трансформаторов с подмагничиванием.

Таблица 2

Трансформаторы тока типа	ТНП-7	ТНП-12	ТНПШ-1	ТНПШ-3
Материал сердечника	Э4АА	Э4АА	ХВП	ХВП
Вес сердечника при наличии подмагничивания, *кг*	142	200	66	99
Материал сердечника	Сталь ХВП			
Вес сердечника при отсутствии подмагничивания, *кг*	440	624	300	450
Материал сердечника	Пермаллой молибденовый			
Вес сердечника при отсутствии подмагничивания, *кг*	50	71	34	51

Применив более грубое реле, например типа ЭТ-521 с потреблением $P_{ср2} = 0{,}08$ *ва*, с этими трансформаторами можно осуществить весьма надежную защиту для разветвленных систем, действующую на отключение, при достаточной чувствительности порядка 4,4...5,2 *а*. В этих условиях вес стальных трансформаторов без подмагничивания оказывается недопустимо большим. Особенно значительные затруднения возникают при изготовлении без подмагничивания трансформаторов шинного типа, так как к весу стали прибавляется еще значительный вес шин [Л. 2].

Уменьшение высоты пакета и веса стали трансформаторов без подмагничивания до конструктивно приемлемых значений приводит к значительному загрублению защиты, ограничивающему область ее применения, и к необходимости использования реле, более чувствительных, чем ЭТ-521, что понижает надежность защиты. Повышение первичного тока небаланса также влияет на надежность и в некоторых случаях, в особенности при трансформаторах шинного типа, требует значительного дополнительного загрубления защиты. Так, в шинных трансформаторах

из стали ХВП без подмагничивания при нормальной работе $I_{нб}$ может быть порядка 1,5 *а*.

Заключение. Из изложенного следует, что подмагничивание переменным током сердечников трансформаторов является эффективным и необходимым мероприятием, позволяющим осуществить простую и высокочувствительную токовую защиту от замыканий на землю генераторов и других крупных элементов энергосистемы. При этом отпадает необходимость в затрате дорогих магнитных сплавов типа пермаллой.

Накопленный широкий опыт применения трансформаторов с подмагничиванием показывает, что небольшое усложнение конструкции трансформаторов, вызываемое применением подмагничивания, не создает никаких затруднений при их изготовлении и эксплуатации.

В большинстве случаев практики достаточно точный инженерный расчет трансформаторов с подмагничиванием может быть выполнен по полуэмпирическому методу, основанному на формальном допущении о синусоидальности всех токов, магнитных потоков и э. д. с. трансформатора.

В испытаниях по настоящей работе принимала деятельное участие А. В. Островская.

Приложение. Вывод зависимости (1).

Обозначим через g отрезок оси абсцисс, отсекаемый касательной к вольтамперной характеристике (рис. 2). Суммарная э. д. с., действующая во вторичной цепи:

$$\dot{E} = \dot{E}_{I} + \dot{E}_{II} = \dot{I}_{э0} Z_{\delta}.$$

Если бы сопротивление намагничивания каждого сердечника было $\frac{Z_0}{2}$ независимо от угла δ_0, то для получения э. д. с. $\dot{E}_{I}$ и $\dot{E}_{II}$ следовало бы к вектору результирующих н. с. каждого магнитопровода прибавить прямопротивоположный по направлению вспомогательный вектор G_{I} или G_{II}, модуль которого равен отрезку g.

На рис. 3 дана векторная диаграмма н. с. с учетом введенных нами векторов G_{I} и G_{II}. На диаграмме угол δ_0 соответствует сдвигу фаз между н. с. I_{μ} и $I_{э0}$ для одного из магнитопроводов. Для другого магнитопровода угол между н. с. тех же токов равен $180°-\delta_0$.

Согласно рис. 2 и 3

$$\dot{E}_{I} = (\dot{I}_{\mu} + \dot{I}_{э0} + G_{I}) \frac{Z_0}{2};$$

$$\dot{E}_{II} = (-\dot{I}_{\mu} + \dot{I}_{э0} + G_{II}) \frac{Z_0}{2};$$

$$\dot{E} = \dot{E}_{I} + \dot{E}_{II} = (2\dot{I}_{э0} + G_{I} + G_{II}) \frac{Z_0}{2} = \dot{I}_{э0} Z_{\delta}.$$

Отсюда

$$Z_{\delta} = Z_0 \frac{2\dot{I}_{э0} + G_{I} + G_{II}}{2I_{э0}}. \qquad (I,1)$$

Из этого выражения можно найти величину и фазный угол сопротивления Z_{δ} в зависимости от δ_0. Однако мы ограничимся определением лишь абсолютной величины Z_{δ}.

Совмещая ось мнимых величин с направлением вектора I_{μ} (рис. 3), имеем:

$$2\dot{I}_{э0} + G_{I} + G_{II} = 2\dot{I}_{э0} \sin\delta_0 + 2j\dot{I}_{э0} \cos\delta_0 - g(\cos\theta_{I} + \cos\theta_{II}) + jg(\sin\theta_{I} - \sin\theta_{II}).$$

Практически углы θ_{I} и θ_{II} близки к 90°, и можно принять

$$\cos\theta_{I} \approx \operatorname{ctg}\theta_{I} = \frac{I_{э0}\sin\delta_0}{I_{\mu} + I_{э0}\cos\delta_0};$$

$$\cos\theta_{II} \approx \operatorname{ctg}\theta_{II} = \frac{I_{э0}\sin\delta_0}{I_{\mu} - I_{э0}\cos\delta_0};$$

$$\cos\theta_{I} + \cos\theta_{II} \approx \frac{2I_{э0}\sin\delta_0}{I_{\mu}};$$

$$\sin\theta_{I} - \sin\theta_{II} \approx 0.$$

Отсюда находим:

$$2\dot{I}_{э0} + G_{I} + G_{II} = 2\dot{I}_{э0}\sin\delta_0 \left(1 - \frac{g}{I_{\mu}}\right) + 2j\dot{I}_{э0}\cos\delta_0.$$

Но из графика рис. 2

$$1 - \frac{g}{I_{\mu}} = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\alpha_1}.$$

Следовательно,

$$|2\dot{I}_{э0} + G_{I} + G_{II}| = \frac{2I_{э0}}{\operatorname{tg}\alpha_1} \sqrt{(\operatorname{tg}\alpha \sin\delta_0)^2 + (\operatorname{tg}\alpha_1 \cos\delta_0)^2}.$$

Подставив в (I,1), находим искомое сопротивление холостого хода:

$$z_{\delta} = \sqrt{\operatorname{tg}^2\alpha \sin^2\delta_0 + \operatorname{tg}^2\alpha_1 \cos^2\delta_0}. \qquad (I,2)$$

Литература

1. И. М. Сирота. Чувствительная защита генераторов от замыкания на землю. Автоматика и телемеханика в энергосистемах (материал научно-технической сессии 1949 г.), Госэнергоиздат, 1950.

2. И. М. Сирота. Токи небаланса трансформаторов тока нулевой последовательности. Электричество, № 6 1952.

[21. 4. 1952]

◇ ◇ ◇

Влияние пористости на электрическую прочность твердых диэлектриков

Кандидат физ.-матем. наук, доц. Е. К. ЗАВАДОВСКАЯ

Томский политехнический институт им. Кирова

Приведены результаты испытания некоторых диэлектриков импульсной нагрузкой и показана зависимость электрической прочности от пористости материала.

Высоковольтный фарфор, важнейший изоляционный материал, может иметь значительную закрытую пористость. Пористость фарфора мы характеризовали или числом пор, приходящимся на единицу площади шлифа, или длиной, занимаемой порами на протяжении 1 *мм*. Исследование производилось с помощью микроскопа при 45-кратном увеличении.

Испытанию подвергались изоляторы типа П-4,5, снятые с высоковольтной линии электропередачи. Изоляторы пробивались импульсной нагрузкой в масле. Для исследования каждый изолятор разрезался по месту пробоя. Срез шлифовался и на шлифе измерялась пористость. Затем отрезался слой фарфора и из него изготовлялись образцы в виде кубиков $15 \times 15 \times 15$ *мм* для испытания на сжатие и образцы с лунками для испытания на пробой.

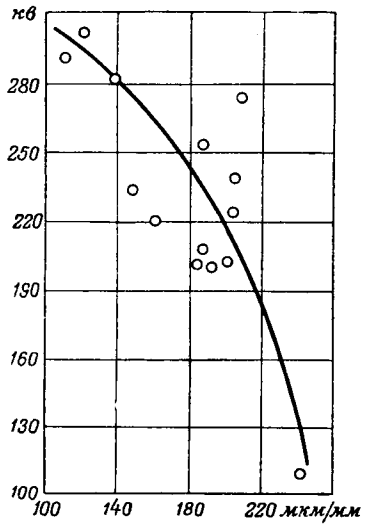


Рис. 1. Зависимость импульсного пробивного напряжения изоляторов от пористости.

На рис. 1 приведена зависимость пробивного напряжения фарфоровых изоляторов от их пористости. Пробивное напряжение подавалось импульсами 1,5/40 по методу полной волны. На рис. 1 по оси ординат отложено амплитудное значение пробивного напряжения в киловольтах, а по оси абсцисс — общая длина пор, выраженная в микронах, на длине в 1 *мм* (*мкм/мм*).

Значительное уменьшение величины пробивного напряжения фарфорового изолятора при увеличении пористости имеет простой физический смысл. С увеличением пористости уменьшается суммарная толщина слоя фарфора. Таким образом, кривую, представленную на рис. 1, следует понимать как зависимость пробивного напряжения от толщины фарфора в неоднородном электрическом поле. Вид этой кривой соответствует обычно получаемой зависимости пробивного напряжения от толщины образца для твердых диэлектриков при испытании их в неоднородном поле. Систематической зависимости величины пробивного напряжения изолятора от числа пор на единицу поверхности мы не получили. Это объясняется тем, что линейные размеры пор были весьма различными. Встречались поры размерами от 4 до 880 *мкм*.

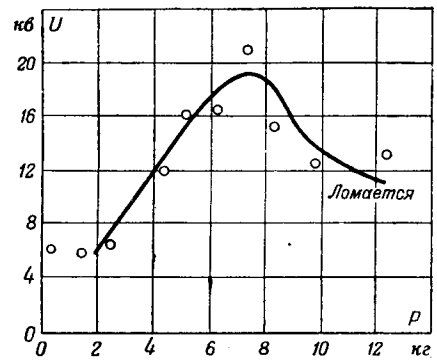


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения эбонита от механической нагрузки.

Систематической зависимости между пробивным напряжением и пористостью при испытании фарфора в образцах толщиной 0,5 и 2 *мм* получено не было. Попадавшиеся поры больших размеров значительно снижали пробивное напряжение такого ослабленного образца.

У стекла понижение величины пробивного напряжения наблюдалось в связи с нарушением однородности материала и с увеличением давления на образец. В аналогичных условиях опыта с эбонитом, слюдой (рис. 2 и 3) и некоторыми другими диэлектриками происходило увеличение пробивного напряжения при возрастании давления на образец, объясняемое закрытием пор и

улучшением однородности материала при его сжатии.

Эти опыты привели к заключению, что иногда наблюдаемое увеличение пробивного напряжения при увеличении внешнего давления является вторичным эффектом, обязанным своим происхождением неоднородности диэлектрика.

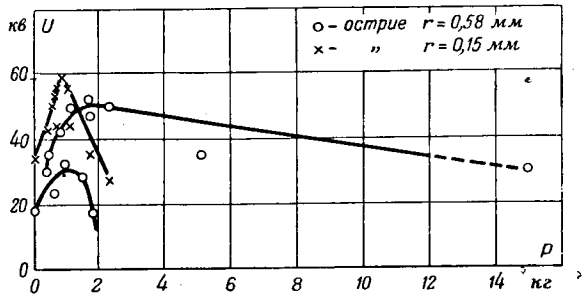


Рис. 3. Зависимость пробивного напряжения слюды от механической нагрузки при пробое в неоднородном поле.

С увеличением давления до некоторой величины пористость, имеющаяся в диэлектрике, закрывается. Улучшается его однородность и растет пробивная прочность. Таким образом, по характеру зависимости пробивного напряжения от величины внешнего давления можно оценить степень дефектности изолирующих материалов. Дальнейшее увеличение давления может вызвать уже и понижение электрической прочности. Например, для эбонита при увеличении давления на электроды в начале наблюдалось повышение пробивного напряжения почти в 4 раза, а при последующем увеличении давления происходило снижение пробивного напряжения. Подобная зависимость пробивного напряжения от давления наблюдалась также для слюды, каменной соли и других диэлектриков.

На рис. 4 приведена зависимость пробивного напряжения состава Э-3 от температуры по данным А. А. Воробьева и А. Н. Снегирева [Л. 1].

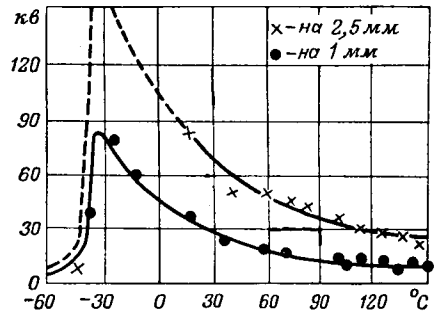


Рис. 4. Зависимость пробивного напряжения состава Э-3 от температуры при переменном токе.

Понижение пробивного напряжения на переменном токе при температуре около — 40° С связано с растрескиванием материала, что подтверждалось специальными испытаниями.

Приведенные результаты исследований показали, что уменьшение внутренней пористости диэлектрика сопровождается повышением его электрической прочности.

Литература

1. А. А. Воробьев. Известия Томского политехнического института им. Кирова, т. 59, вып. 2, стр. 169, 1941.

[2. 7. 1952

✧ ✧ ✧

Импульсная реакция приборов магнитоэлектрической системы

Кандидат техн. наук, доц. Р. Р. ХАРЧЕНКО

Московский энергетический институт им. Молотова

Выводятся уравнения движения подвижной части магнитоэлектрического прибора под воздействием импульсов разных форм. По этим уравнениям рассчитываются номограммы баллистических погрешностей и погрешностей записи импульса осциллографом.

Многие задачи измерительной техники связаны с расчетом импульсной реакции приборов магнитоэлектрической системы. В качестве примеров можно привести:

а) баллистический метод измерения магнитных величин;

б) запись магнитоэлектрическим осциллографом (в частности, кардиографом) ударных волн и им подобных изменений любых неэлектрических величин, преобразованных в электрические;

в) установление соотношений между временем срабатывания и заданным отклонением для магнитоэлектрических реле в устройствах автоматического контроля;

г) оценка динамических ошибок некоторых типов виброметров и сейсмометров.

Таким образом, расчет импульсной реакции прибора следует считать важной общей задачей измерительной техники.

Задача эта до настоящего времени ставилась и рассматривалась несколько специфически — только в аспекте баллистических измерений. При такой постановке нет нужды выявлять всю кривую движения подвижной части прибора; важно найти только баллистическую погрешность при очень коротком импульсе тока.

К сожалению, последние наиболее глубокие исследования баллистического режима, принадлежащие советской школе [Л. 1], в технической литературе должным образом не зафиксированы и широким кругам научных работников не известны.

По импульсной реакции осциллографа работы инженерного характера почти отсутствуют. В литературе нельзя найти прямых указаний, как надо выбирать вибратор (шлейф) осциллографа, чтобы запись импульса заданной формы и длительности была гарантирована с определенной точностью. Непосредственное отношение к этому вопросу имеет только одна классическая работа А. А. Харкевича [Л. 2], в которой предложен критерий интегральной квадратичной погрешности и рассмотрен случай применения последнего к осциллографу. Однако этот критерий, как ниже будет показано, в нашей задаче себя не оправдывает и должен быть заменен другим.

Вопрос об импульсной реакции магнитоэлектрических реле вовсе никем не затрагивался, судя по отсутствию в литературе каких бы то ни было данных.

Целью настоящей работы является получение уравнений движения подвижной части магнитоэлектрического прибора для некоторых, наиболее важных форм импульса (рис. 1) — в явном виде, без упрощающих допущений и без ограничений на длительность импульса. По этим уравнениям далее рассчитываются номограммы баллистических погрешностей и погрешностей осциллографа.

Известно, что в магнитных измерениях по баллистическому методу характерными являются два вида импульсов: 1) при скачкообразном изменении тока в намагничивающей цепи без изменения направления тока получается форма *5*; этот вид импульса включает в себя признаки форм *1* и *2*; поэтому соответствующая кривая баллистических погрешностей должна находиться в «вилке» погрешностей, вычисленных для форм *1* и *2*; 2) при коммутации тока в намагничивающей цепи получается форма *6*. Расчет импульсной реакции для этой формы едва ли возможен вследствие чрезмерной сложности. Представление этой формы в виде двух кратковременных прямоугольных импульсов (форма *7*), разделенных некоторым промежутком времени и содержащих такое же количество электричества, как и действительный двойной импульс, является столь условной идеализацией, что мы от него отказываемся. По нашему мнению, вопрос о расчете баллистических погрешностей для формы *6* остается открытым и его следует разрешать экспериментально.

Импульс прямоугольной формы *3* является характерным для измерения скоростей и промежутков времени. Импульс треугольной формы *4*

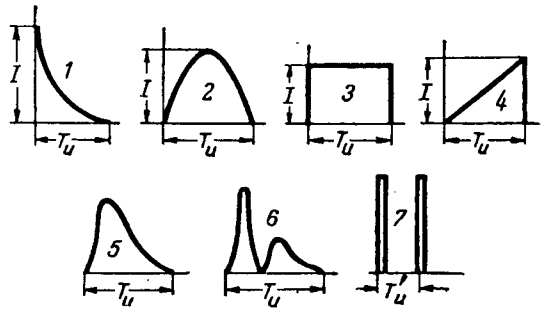


Рис. 1. Формы импульсов.

встречается при осциллографировании процессов в схемах динамической компенсации.

Итак, мы приводим расчеты реакции прибора для импульсных форм *1*, *2*, *3* и *4*.

Для общности результатов вводим во все уравнения безразмерные величины: степень успокоения β — в качестве параметра и круговую частоту собственных колебаний, умноженную на время, $\omega_0 t = \tau$ — в качестве независимой переменной; как известно, β и τ являются критериями динамического подобия. В соответствии с этим необходимо время импульса T_u (рис. 1), время баллистического отброса t_1 и время возврата t_2 заменить безразмерными величинами: $\Delta = \omega_0 T_u$; $\tau_1 = \omega_0 t_1$; $\tau_2 = \omega_0 t_2$. В дальнейшем мы еще будем пользоваться следующими обозначениями: S_i — чувствительность прибора по току; I — амплитуда импульса тока (рис. 1); Q — количество электричества в импульсе;

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta}; \quad x = \operatorname{arth} \frac{\sqrt{\beta^2-1}}{\beta}.$$

Предварительно напишем известные уравнения движения, которые нам понадобятся для ссылок (таблица).

Теперь обратим внимание на то, что уравнения движения при включении постоянного тока выражают при $I = 1$ переходную функцию, которую обозначим через A; соответственно уравнения идеального баллистического режима при $Q = 1$ выражают реакцию на единичный импульс A'. Функции A и A', связанные соотношением $A' = \frac{dA}{d\tau}\omega_0$, необходимы нам для вывода искомых формул.

К ним надо добавить еще выражения заданных импульсов тока (рис. 1), которые, очевидно, запишутся так:

а) экспонента $i = Ie^{-\frac{\tau}{\delta}}$; $\delta = \omega_0 t_u$, где t_u — постоянная времени импульса; $I = \frac{\omega_0}{\delta} Q$;

2) синусоида $i = I \sin \frac{\pi\tau}{\Delta}$; $\tau = 0 \ldots \Delta$; $I = \frac{\omega_0 \pi}{2\Delta} Q$;

3) прямоугольник $i = I$; $\tau = 0 \ldots \Delta$; $I = \frac{\omega_0}{\Delta} Q$;

4) треугольник $i = \frac{\tau}{\Delta} I$; $\tau = 0 \ldots \Delta$.

Успокоение	Уравнение движения	Время установки $\times \omega_0$	Время отброса $\times \omega_0$	Время возврата $\times \omega_0$	Баллистическое отклонение
$\beta < 1$	Включение постоянного тока $a = S_i I \left[1 - \frac{e^{-\beta\tau}}{\sin\varphi} \times \sin(\sqrt{1-\beta^2}\,\tau + \varphi)\right]$	$\tau_y \approx \frac{1}{\beta} \ln \frac{100}{f_1}$, где f_1 — точность установки на отсчет в % к $S_i I$ (формула тем точнее, чем меньше β)	—	—	—
	Идеальный баллистический режим $a = \frac{S_i \omega_0 Q e^{-\beta\tau}}{\sin\varphi} \sin(\sqrt{1-\beta^2}\,\tau)$		$\tau_1 = \frac{\varphi}{\sin\varphi}$	$\tau_2 \approx \frac{1}{\beta} \ln \frac{100}{f_2}$, где f_2 — точность установки на нуль в % к τ_0 (формула тем точнее, чем меньше β)	$a_0 = Si\omega_0 Q e^{-\frac{\varphi}{\operatorname{tg}\varphi}}$
$\beta = 1$	Включение постоянного тока $a = S_i I \left[1 - e^{-\tau}(1+\tau)\right]$	$e^{-\tau_y}(1+\tau_y) = \frac{f_1}{100}$			
	Идеальный баллистический режим $a = S_i \omega_0 Q \tau e^{-\tau}$		$\tau_1 = 1$	$e^{-\tau_2}(1+\tau_2) = \frac{f_2}{100}$	$a_0 = \frac{S_i \omega_0 Q}{e}$
$\beta > 1$	Включение постоянного тока $a = S_i I \left[1 - \frac{e^{-\beta\tau}}{\operatorname{sh} x} \times \operatorname{sh}(\sqrt{\beta^2-1}\,\tau + x)\right]$	$\tau_y \approx 2\beta \ln \frac{100}{f_1}$ (формула тем точнее, чем больше β)			
	Идеальный баллистический режим $a = \frac{S_i \omega_0 Q e^{-\beta\tau}}{\operatorname{sh} x} \operatorname{sh}(\sqrt{\beta^2-1}\,\tau)$		$\tau_1 = \frac{x}{\operatorname{sh} x}$	$\tau_2 \approx 2\beta \ln \frac{100}{f_2}$ (формула тем точнее, чем больше β)	$a_0 = S_i \omega_0 Q e^{-\frac{x}{\operatorname{th} x}}$

По этим исходным данным, пользуясь интегральными уравнениями Дюамеля, мы нашли следующие формулы импульсной реакции приборов:

Для экспоненциального импульса

$$\beta<1;\ \alpha=S_i\omega_0 Q\left[\frac{e^{-\frac{\tau}{\delta}}}{\frac{1}{\delta}+\delta-2\beta}+\right.$$

$$\left.+\frac{e^{-\beta\tau}}{\sqrt{1-\beta^2}\sqrt{1-2\delta\beta+\delta^2}}\sin\left(\sqrt{1-\beta^2}\,\tau-\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\frac{1}{\delta}-\beta}\right)\right];$$

$$\beta=1;\ \alpha=S_i\omega_0 Q\left[\frac{e^{-\tau}}{1-\delta}\left(\tau-\frac{\delta}{1-\delta}\right)+\frac{\delta e^{-\frac{\tau}{\delta}}}{(1-\delta)^2}\right];$$

$$\beta>1;\ \alpha=S_i\omega_0 Q\left[\frac{e^{-\frac{\tau}{\delta}}}{\frac{1}{\delta}+\delta-2\beta}+\right.$$

$$\left.+\frac{e^{-\beta\tau}}{\sqrt{\beta^2-1}\sqrt{1-2\delta\beta+\delta^2}}\operatorname{sh}\left(\sqrt{\beta^2-1}\,\tau-\operatorname{arth}\frac{\sqrt{\beta^2-1}}{\frac{1}{\delta}-\beta}\right)\right].$$

Для синусоидального импульса

$$\beta<1;$$

область $\tau>\Delta$;

$$\alpha=S_i\omega_0 Q\,\frac{\pi^2 e^{-\beta\tau}\cos\psi}{2\sqrt{1-\beta^2}\,[(2\beta^2-1)\Delta^2+\pi^2]}\times$$

$$\times\left\{e^{\beta\Delta}\sin\left[\sqrt{1-\beta^2}\,(\tau-\Delta)+\psi\right]+\right.$$

$$\left.+\sin\left(\sqrt{1-\beta^2}\cdot\tau+\psi\right)\right\},\ \text{где}\ \psi=\operatorname{arctg}\frac{2\beta\sqrt{1-\beta^2}\cdot\Delta^2}{(2\beta^2-1)\Delta^2+\pi^2};$$

$$\beta<1;$$

область $\tau<\Delta$;

$$\alpha=\frac{S_i\omega_0 Q\pi^2 e^{-\beta\tau}\cos\psi}{2\sqrt{1-\beta^2}\,[(2\beta^2-1)\Delta^2+\pi^2]}\times$$

$$\times\left\{e^{\beta\tau}\left[\left(\sin\frac{\pi}{\Delta}\tau\right)\frac{\Delta\sqrt{1-\beta^2}\,(\Delta^2-\pi^2)\cos\psi}{\pi\,[(2\beta^2-1)\Delta^2+\pi^2]}-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\left(\cos\frac{\pi}{\Delta}\tau\right)+\sin\psi\right]+\sin\left(\sqrt{1-\beta^2}\tau+\psi\right)\right\};$$

$$\beta=1;$$

область $\tau>\Delta$;

$$\alpha=\frac{S_i\omega_0 Q\pi^2 e^{-\tau}}{2(\pi^2+\Delta^2)}\left\{e^{\Delta}\left[(\tau-\Delta)+\frac{2\Delta^2}{\pi^2+\Delta^2}\right]+\right.$$

$$\left.+\left[\tau+\frac{2\Delta^2}{\pi^2+\Delta^2}\right]\right\};$$

$$\beta>1;$$

область $\tau>\Delta$;

$$\alpha=S_i\omega_0 Q\,\frac{\pi^2 e^{-\beta\tau}\operatorname{ch} y}{2\sqrt{\beta^2-1}\,[(2\beta^2-1)\Delta^2+\pi^2]}\times$$

$$\times\left\{e^{\beta\Delta}\operatorname{sh}\left[\sqrt{\beta^2-1}\,(\tau-\Delta)+y\right]+\right.$$

$$\left.+\operatorname{sh}\left(\sqrt{\beta^2-1}\,\tau+y\right)\right\},\ \text{где}\ y=\operatorname{arth}\frac{2\beta\sqrt{\beta^2-1}\,\Delta^2}{(2\beta^2-1)\Delta^2+\pi^2}.$$

Для прямоугольного импульса

$$\beta<1;$$

область $\tau>\Delta$;

$$\alpha=S_i\omega_0 Q\left\{\frac{e^{-\beta(\tau-\Delta)}}{\Delta\sin\varphi}\cdot\sin\left[\sqrt{1-\beta^2}\,(\tau-\Delta)+\varphi\right]-\right.$$

$$\left.-\frac{e^{-\beta\tau}}{\Delta\sin\varphi}\sin\left(\sqrt{1-\beta^2}\,\tau+\varphi\right)\right\};$$

$$\beta<1;$$

область $\tau<\Delta$;

$$\alpha=\frac{S_i\omega_0 Q}{\Delta}\left[1-\frac{e^{-\beta\tau}}{\sin\varphi}\sin\left(\sqrt{1-\beta^2}\,\tau+\varphi\right)\right];$$

$$\beta=1;$$

область $\tau>\Delta$;

$$\alpha=\frac{S_i\omega_0 Q}{\Delta}\left\{e^{-(\tau-\Delta)}[\tau+1-\Delta]-e^{-\tau}(\tau+1)\right\};$$

$$\beta>1;$$

область $\tau>\Delta$;

$$\alpha=S_i\omega_0 Q\left\{\frac{e^{-\beta(\tau-\Delta)}}{\Delta\operatorname{sh}x}\operatorname{sh}\left[\sqrt{\beta^2-1}\,(\tau-\Delta)+x\right]-\right.$$

$$\left.-\frac{e^{-\beta\tau}}{\Delta\operatorname{sh}x}\operatorname{sh}\left(\sqrt{\beta^2-1}\,\tau+x\right)\right\}.$$

Для треугольного импульса

$$\beta<1;$$

область $\tau>\Delta$;

$$\alpha=\frac{S_i I}{\sin\varphi}\left\{e^{-\beta(\tau-\Delta)}\sin\left[\sqrt{1-\beta^2}\,(\tau-\Delta)+\varphi\right]-\right.$$

$$-\frac{1}{\Delta}e^{-\beta(\tau-\Delta)}\sin\left[\sqrt{1-\beta^2}\,(\tau-\Delta)+2\varphi\right]+$$

$$\left.+\frac{1}{\Delta}e^{-\beta\tau}\sin\left(\sqrt{1-\beta^2}\,\tau+2\varphi\right)\right\};$$

$$\beta<1;$$

область $\tau<\Delta$;

$$\alpha=\frac{S_i I}{\Delta}\left[\tau-2\beta+\frac{e^{-\beta\tau}}{\sin\varphi}\sin\left(\sqrt{1-\beta^2}\,\tau+2\varphi\right)\right].$$

Все выведенные уравнения могут быть проверены различными способами, например:

1) в одинаковых областях времени, но при разных режимах успокоения они взаимно обратимы подстановкой $\sqrt{1-\beta^2}=j\sqrt{\beta^2-1}$; кроме того, их легко свести к соответствующим формулам для $\beta=1$ посредством предельного перехода $\beta\to1$; получающаяся при этом неопределенность раскрывается по правилу Лопиталя;

2) в разных областях времени, но при одинаковых режимах успокоения ($\beta<1$) они становятся тождественными на границе соприкосновения областей ($\tau=\Delta$);

3) в области $\tau>\Delta$ они превращаются в уравнения идеального баллистического режима при предельном переходе $\Delta\to0$.

После вывода написанных уравнений была произведена трудоемкая работа решения производных уравнений $\frac{d\alpha}{d\tau}=0$; это дало значения не-

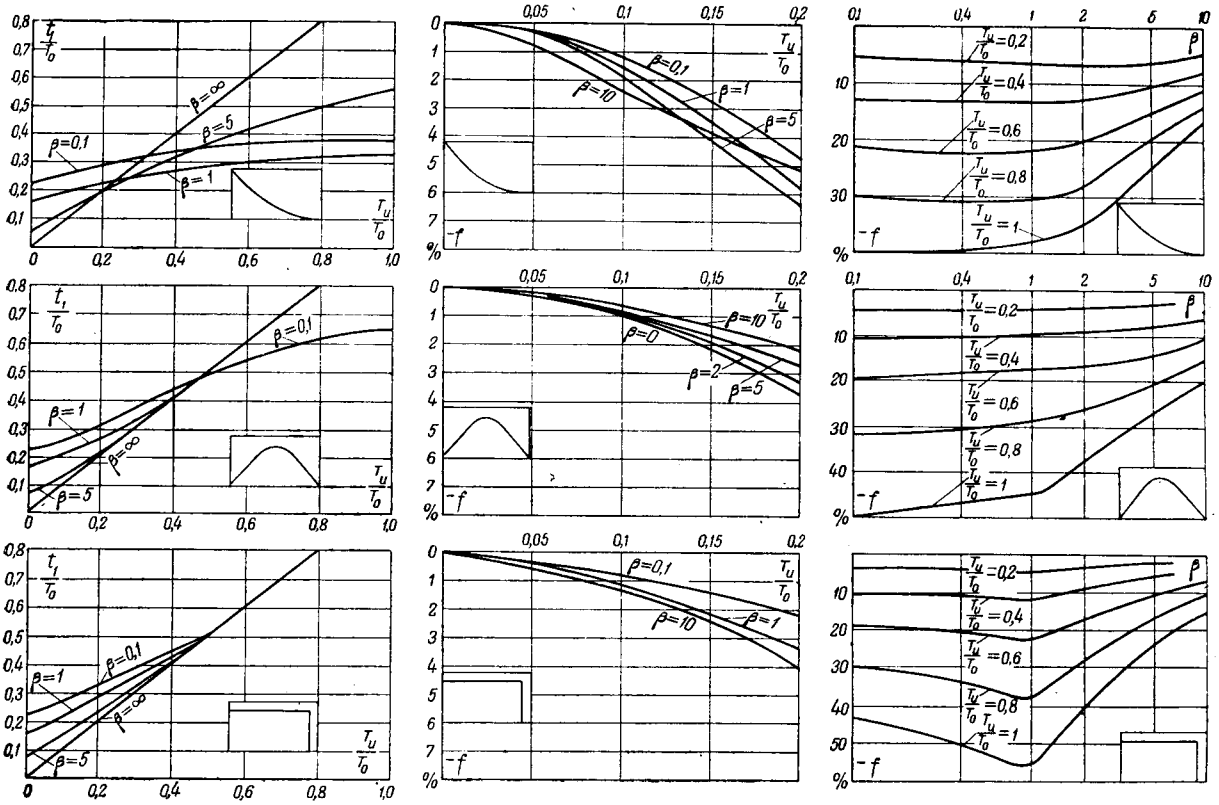


Рис. 2. Времена отброса и баллистические погрешности для разных форм импульса.

зависимой переменной τ_1, по которым вычислялись баллистические отклонения α_1. Последние же определяют баллистическую погрешность $f\% = \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha_0} 100$.

Результаты всех вычислений изображены в виде номограмм на рис. 2.

Экспоненциальный импульс мы считали практически оканчивающимся в течение промежутка времени $T_u = 4t_u$ или в безразмерных координатах $\Delta = 4\delta$.

Для техники магнитных измерений достаточно было бы сделать расчеты на длительность импульса в пределах $T_u = 0 \ldots 0{,}2T_0$. Но, учитывая потребности и других областей измерительной техники, мы повысили верхний расчетный предел до $T_u = T_0$.

Из полученных точных кривых видно, что баллистическая погрешность почти не зависит от степени успокоения (для $\beta < 1$).

Опытным путем мы проверили баллистические погрешности для формы импульса 5. Как и предполагалось, все они оказались в „вилке" кривых погрешностей, вычисленных для форм импульса 1 и 2 (при одинаковом успокоении прибора).

Следующая задача, в которой были применены выведенные уравнения, это — задача о точности записи импульсов посредством осциллографа.

Прежде всего надо было выбрать критерий для оценки точности.

А. А. Харкевич [Л. 2] ввел для специальных исследований динамики воспроизводящих систем критерий интегральной квадратичной погрешности, определяемый формулами

$$S = \int_0^\infty |a|^2 dt \quad \text{или} \quad S = \int_0^{T_u} |a|^2 dt,$$

где a — мгновенная погрешность.

Этот критерий полезен для ряда задач, но для нашей задачи он не подходит.

Рассмотрим осциллограмму экспоненциального импульса (рис. 3); здесь 1 — истинная кривая импульса в масштабе S_i; 2 — действительная кривая, записанная осциллографом; a — мгновенная погрешность. Увеличим (при $l = пост$) постоянную времени импульса и представим себе новую осциллограмму, у которой скорость съемки выбрана таким образом, чтобы все изображение расположилось по прежней базе l. Ясно, что заштрихованная площадь теперь уменьшится, так как форма длинного импульса воспроизводится осцил-

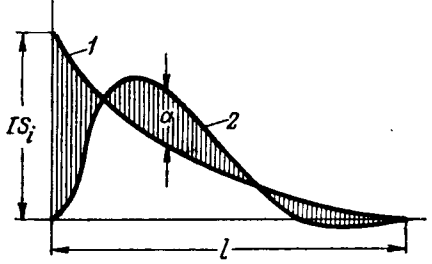


Рис. 3. Запись осциллографом экспоненциального импульса.

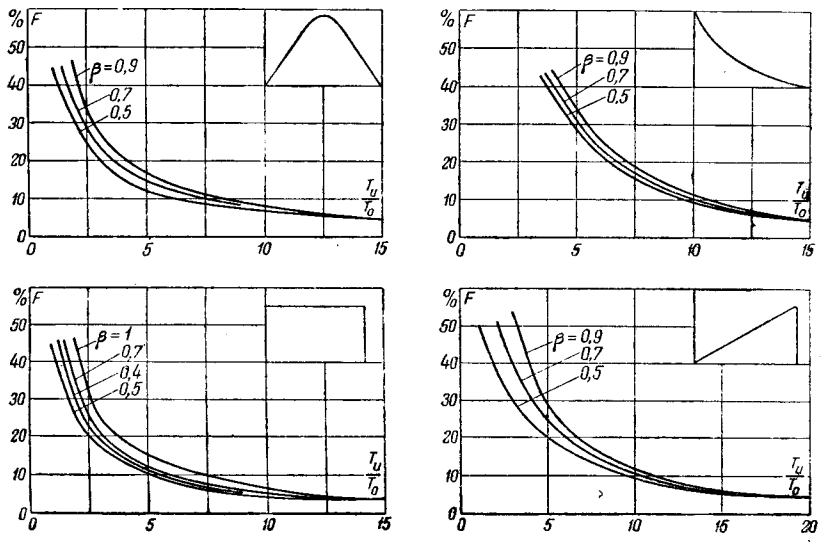


Рис. 4. Значения критерия F для разных форм импульса.

лографом лучше, чем форма короткого. Указанное действительное положение вещей и должно отображаться искомым критерием, в то время как поведение критерия S ему противоречит, ибо величина S с увеличением длительности импульса не убывает, а возрастает. Возникшее затруднение можно преодолеть посредством перехода от абсолютных к относительным погрешностям, которыми собственно и принято всегда характеризовать качество измерения.

Таким образом, мы пришли к новому критерию, который мы определяем формулой

$$F\% = \frac{\int_0^{\infty} |a|\,dt}{S_i \int_0^{T_u} idt}\,100$$

и называем критерием „относительной погрешности воспроизведения формы импульса".

Подсчет этого критерия очень прост; на теоретической кривой или осциллограмме (рис. 3) планиметрируется площадь, показанная штриховкой, и площадь заданного импульса; затем берется отношение этих площадей.

Пользуясь критерием F и уравнениями движения, мы выяснили весьма существенный вопрос о выборе частоты собственных колебаний вибратора осциллографа для записи импульса заданной формы с заданной точностью.

На рис. 4 показаны рассчитанные нами графики критерия F в функции $\frac{T_u}{T_0}$ для четырех форм импульсов. Степень успокоения β принималась в пределах 0,5 ... 0,9 — соответственно действительным условиям работы осциллографа. Для экспоненты мы полагали, как и прежде, $T_u = 4t_u$, где t_u — постоянная времени.

Изображенные кривые показывают, что импульс записывается с удовлетворительной точностью (в 10% по критерию F), если отношение длительности импульса T_u к периоду собственных колебаний вибратора T_0 [Л. 3] будет не меньше, чем: у экспоненты — 10 ... 11, у синусоиды — 6 ... 8, у прямоугольника — 5 ... 7, у треугольника — 9 ... 12. Промежуточные формы импульса, повидимому, должны характеризоваться промежуточными отношениями.

Опытное определение критерия F подтвердило наши расчеты. Опыт заключался в снятии осциллограмм импульсов двумя последовательно включенными вибраторами — низкочастотным и высокочастотным; чувствительность вибраторов уравнивалась внешими шунтами; длительность импульсов выбиралась таким образом, чтобы один вибратор давал искаженную запись, а другой — неискаженную. Последующие подсчеты по осциллограммам величины $F\%$ дали возможность проверить отдельные точки номограмм рис. 4.

Все найденные опытным путем значения F оказались несколько меньше расчетных. Это объясняется тем, что реальная частотная характеристика вибраторов с жидкостным успокоением вследствие нелинейности системы не полностью совпадает с идеальной, теоретической характеристикой [Л. 3].

Таким образом, нашими номограммами можно надежно пользоваться для обоснованного выбора вибраторов осциллографа при записи импульсов. После предварительной записи импульса любым вибратором надо определить по отметчику времени его длительность и затем выбрать вибратор с такой частотой собственных колебаний (в масле), чтобы отношение $\frac{T_u}{T_0}$ соответствовало допустимой погрешности.

Литература

1. А. М. Ермакова. Методика определения магнитных характеристик материалов с большой коэрцитивной силой. Кандидатская диссертация. ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1949.

2. А. А. Харкевич. О применении критерия квадратичной погрешности к оценке линейных искажений. ЖТФ, т. VII, вып. 5, 1937.

3. Р. Р. Харченко. Опытное определение динамических характеристик и конструктивных параметров приборов магнитоэлектрической системы. Электричество, № 4, 1952.

[20. 8. 1952]

◇ ◇ ◇

Расчет переходных процессов в длинных линиях при помощи цилиндрических функций от двух независимых переменных

П. И. КУЗНЕЦОВ

Москва

Показывается, что переходные процессы в длинных линиях выражаются в конечной форме через цилиндрические функции от двух независимых переменных.

Необходимость в расчете переходных процессов в длинных линиях с учетом различных приемников на их концах постоянно возникает в различных областях электротехники. Задачи, которые приходится решать при этом расчете, приводятся к интегралам от функции Бесселя, вычисляемым обычно приближенными методами [Л. 1, 2]. В настоящей работе дается решение этих задач в конечной форме при помощи протабулированных цилиндрических функций от двух переменных. Это позволяет производить количественные и качественные исследования переходных явлений. Таким же путем можно производить расчеты, связанные с изучением процесса распространения волн (волноводы, дифракция, колебания крыла в сверхзвуковом потоке и другие).

Как известно, переходные процессы в длинных линиях [Л. 1, 2] описываются системой уравнений в частных производных:

$$-\frac{\partial V}{\partial x}=RJ+L\frac{\partial J}{\partial t}\quad (t>0); \tag{1}$$

$$-\frac{\partial J}{\partial x}=GV+C\frac{\partial V}{\partial t}\quad (t>0). \tag{2}$$

Здесь $V(x, t)$ и $J(x, t)$ — напряжение и ток в линии в точке с координатой x и в момент времени t;

R, L, C, G — распределенные постоянные, соответственно сопротивление, индуктивность, емкость и проводимость, отнесенные к единице длины линии.

Для иллюстрации метода рассмотрим переходные процессы при включении полубесконечной однородной длинной линии на постоянное единичное напряжение при нулевых начальных условиях (рис. 1). Задача определения переходных токов и напряжений при этом приводится к решению системы уравнений (1), (2) в интервале $0<x<\infty$ для значений времени $t>0$ с граничными условиями

$$V(0, t)=1; \tag{3}$$

$$\lim_{x\to\infty} V(x, t)=0 \tag{4}$$

и начальными условиями

$$V(x, 0)=0; \tag{5}$$

$$J(x, 0)=0. \tag{6}$$

Для решения задачи применим преобразование Лапласа [Л. 3] к уравнениям (1) и (2); приняв во внимание начальные условия (5) и (6), получим следующую вспомогательную систему уравнений:

$$-\frac{d\overline{V}}{dx}=(R+pL)\overline{J}; \tag{7}$$

$$-\frac{d\overline{J}}{dx}=(G+pC)\overline{V}, \tag{8}$$

где

$$\overline{V}(x, p)=\int_0^\infty V(x, t)\,e^{-pt}\,dt;$$

$$\overline{J}(x, p)=\int_0^\infty J(x, t)\,e^{-pt}\,dt.$$

Далее, применив преобразование Лапласа к граничным условиям (3) и (4), получим:

$$\overline{V}(0, p)=\frac{1}{p}, \tag{9}$$

$$\lim_{x\to\infty}\overline{V}(x, p)=0. \tag{10}$$

Решив систему уравнений (7) и (8), найдем:

$$\overline{V}(x, p)=Ae^{-\gamma x}+Be^{\gamma x}; \tag{11}$$

$$\overline{J}(x, p)=\frac{1}{z_c}(Ae^{-\gamma x}-Be^{\gamma x}). \tag{12}$$

Здесь $\gamma=\sqrt{(R+pL)(G+pC)}$ — коэффициент распространения волны;

$z_c=\sqrt{(R+pL)/(G+pC)}$ — характеристическое сопротивление линии;

A и B — произвольные постоянные.

Использовав условия (9) и (10), найдем произвольные постоянные: $A=1/p$, $B=0$. Подставив их в (11) и (12), получим:

$$\overline{V}(x, p)=\frac{e^{-\gamma x}}{p}; \tag{13}$$

$$\overline{J}(x, p)=\frac{e^{-\gamma x}}{pz_c}. \tag{14}$$

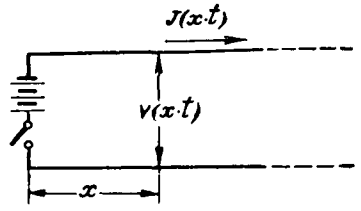


Рис. 1.

Применив к этим уравнениям теорему обращения [Л. 3], находим:

$$V(x,t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{a-j\infty}^{a+j\infty} e^{pt-\gamma x}\frac{dp}{p}; \qquad (15)$$

$$J(x,t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{a-j\infty}^{a+j\infty} \frac{e^{pt-\gamma x}}{z_c}\frac{dp}{p}, \qquad (16)$$

где a — постоянная, бо́льшая, чем действительная часть любой особенности функций $\overline{V}(x,p)$ и $\overline{J}(x,p)$. Легко убедиться, что контурные интегралы (15) и (16) являются решением поставленной задачи [Л. 3].

Применив способ, изложенный в приложении II, к контурным интегралам (15) и (16), найдем [Л. 4]:

$$V(x,t)=e^{-\rho t}[I_0(z)+\Upsilon_1(w_1,z)+\Upsilon_2(w_1,z)+ +\Upsilon_1(w_2,z)+\Upsilon_2(w_2,z)]H(t-\xi); \qquad (17)$$

$$J(x,t)=\sqrt{\frac{G}{R}}e^{-\rho t}\Big[\sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}I_0(z)+\Upsilon_1(w_1,z)+ +\Upsilon_2(w_1,z)-\Upsilon_1(w_2,z)-\Upsilon_2(w_2,z)]H(t-\xi); \qquad (18)$$

здесь $\Upsilon_n(w,z)$ — цилиндрическая функция от двух мнимых переменных (приложение I);

$I_n(z)$ — цилиндрическая функция от одной мнимой переменной [Л. 5];

$H(t-\xi)=0$ при $t<\xi$; $H(t-\xi)=1$ при $t\geqslant\xi$;

$$\alpha=R/2L;\ \beta=G/2C;\ \rho=\alpha+\beta;\ \sigma=\alpha-\beta;$$

$$m=\sqrt{\alpha}+\sqrt{\beta};\ n=\sqrt{\alpha}-\sqrt{\beta};\ v=1/\sqrt{LC};$$

$$\xi=x/v;\ w_1=m^2(t-\xi);\ w_2=n^2(t-\xi);$$

$$z=\sigma\sqrt{t^2-\xi^2}.$$

Этот же результат может быть получен из таблиц операционного исчисления [Л. 3]. Согласно формулам (165) [Л. 3, стр. 166] и (172) [Л. 3, стр. 168] мы найдем решения (17) и (18).

Можно показать, что уравнения (17) и (18) удовлетворяют уравнениям (1) и (2), начальным и граничным условиям (3)...(6) [Л. 6].

Найдем величины напряжения и тока на фронте волны. В этом случае $t=\xi$ и $w_1=0$, $w_2=0$, $z=0$ и $I_0(0)=1$. Согласно формулам (I,57), получим:

$$V=e^{-\rho\xi};\ J=\sqrt{\frac{C}{L}}e^{-\rho\xi}.$$

Легко определить величины напряжения и тока при установившемся режиме [Л. 6]:

$$\lim_{t\to\infty}V(x,t)=e^{-x\sqrt{RG}};$$

$$\lim_{t\to\infty}J(x,t)=\sqrt{\frac{G}{R}}e^{-x\sqrt{RG}}.$$

В случае длинной линии без искажения имеем $\alpha=\beta$ и, следовательно, $w_1=4\alpha(t-\xi)$, $w_2=0$ и $z=0$. На основании формул (I,56) и (I,57) из уравнений (17) и (18) получим известные формулы:

$$V(x,t)=e^{-x\sqrt{RG}}H(t-\xi);$$

$$J(x,t)=\sqrt{\frac{G}{R}}e^{-x\sqrt{RG}}H(t-\xi).$$

Рассмотрим численный пример [Л. 1], для которого возьмем линию с распределенными параметрами:

$$R=7{,}36\ ом/км;\ L=23{,}8\cdot10^{-3}\ гн/км;$$
$$C=11{,}3\cdot10^{-9}\ ф/км;$$
$$G=0{,}5\cdot10^{-6}\ ом^{-1}/км.$$

Результаты вычислений по формулам (17) и (18) приведены в табл. 1 и 2 и на рис. 2 и 3.

При помощи этого метода были рассмотрены переходные процессы в длинной линии конечной длины с приемно-передающими устройствами в начале и в конце линии при включении линии на постоянное напряжение [Л. 7]. В частности,

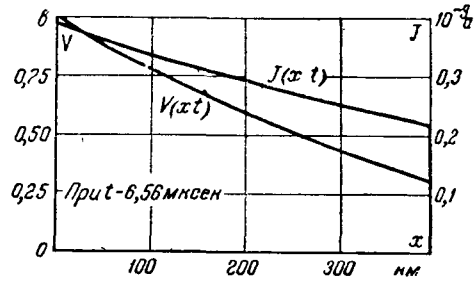


Рис. 2.

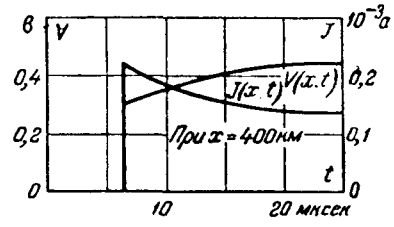


Рис. 3.

был рассмотрен случай, когда сопротивление в начале линии равно нулю, а в конце линии включено устройство, обладающее конечным сопротивлением и индуктивностью. Были даны указания для следующих случаев: 1) длинная линия включается при $t=0$ на постоянное напряжение, которое действует в интервале $0<t<\tau$ и в момент τ становится равным нулю; 2) линия включается на напряжение, являющееся кусочно-непрерывной функцией времени; 3) линия включается на синусоидальное напряжение. Последний случай был подробно рассмотрен В. Н. Кузнецовым [Л. 8].

Рассмотренный метод был применен к изучению переходных процессов в многопроводной системе передачи с приемно-передающими устройствами на концах [Л. 9 и 10].

Таблица 1

$t = x/v = 6{,}56$ *мксек*

x, км	$V(x, t)$, в	$10^3 J(x, t)$, а
0	1,0000	0,3834
100	0,7736	0,3346
200	0,5973	0,2933
300	0,4393	0,2526
400	0,3138	0,2162

Таблица 2

$x = 400$ *км*

t, мксек	$V(x, t)$, в	$10^3 J(x, t)$, а
6,56	0,3138	0,2162
10,00	0,3608	0,1766
15,00	0,3987	0,1491
20,00	0,4205	0,1367
25,00	0,4353	0,1308

Приложение I. *Цилиндрические функции от двух независимых переменных* [Л. 6, 11, 12, 13, 14]. Цилиндрические функции от двух независимых переменных определяются рядами [1]

$$U_n(w, z) = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \left(\frac{w}{z}\right)^{n+2m} J_{n+2m}(z); \qquad (I,1)$$

$$V_n(w, z) = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \left(\frac{z}{w}\right)^{n+2m} J_{n+2m}(z), \qquad (I,2)$$

где $J_n(z)$ — цилиндрическая функция от одного независимого действительного переменного (функция Бесселя);

n — любое целое число.

Графики функций U_1, U_2, V_0 и V_1 для $w = 3$ и для $z = 3$ приведены на рис. 4 и 5.

Из определения функций U_n и V_n следуют соотношения

$$U_n(w, z) + U_{n+2}(w, z) = \left(\frac{w}{z}\right)^n J_n(z); \qquad (I,3)$$

$$V_n(w, z) + V_{n+2}(w, z) = \left(\frac{z}{w}\right)^n J_n(z); \qquad (I,4)$$

$$V_n(w, z) = U_n\left(\frac{z^2}{w}, z\right); \qquad (I,5)$$

$$U_n(w, z) = V_n\left(\frac{z^2}{w}, z\right). \qquad (I,6)$$

Далее отметим следующие соотношения:

$$U_{2n+1}(w, z) + V_{-2n+1}(w, z) = (-1)^n \sin\left(\frac{w}{2} + \frac{z^2}{2w}\right); \qquad (I,7)$$

$$-U_{2n+2}(w, z) + V_{-2n}(w, z) = (-1)^n \cos\left(\frac{w}{2} + \frac{z^2}{2w}\right). \qquad (I,8)$$

В частности, при $n = 0$ имеем:

$$U_1(w, z) + V_1(w, z) = \sin\left(\frac{w}{2} + \frac{z^2}{2w}\right); \qquad (I,9)$$

$$-U_2(w, z) + V_0(w, z) = \cos\left(\frac{w}{2} + \frac{z^2}{2w}\right). \qquad (I,10)$$

Если $w = z$, то

$$U_0(z, z) = V_0(z, z) = \frac{1}{2}\{J_0(z) + \cos z\}; \qquad (I,11)$$

$$U_1(z, z) = V_1(z, z) = \frac{1}{2}\sin z; \qquad (I,12)$$

$$U_2(z, z) = V_2(z, z) = \frac{1}{2}[J_0(z) - \cos z] \qquad (I,13)$$

и вообще

$$U_{2n}(z, z) = V_{2n}(z, z) = \frac{(-1)^n}{2}[J_0(z) + \cos z] - \sum_{m=0}^{n-1} (-1)^{n+m} J_{2m}(z); \qquad (I,14)$$

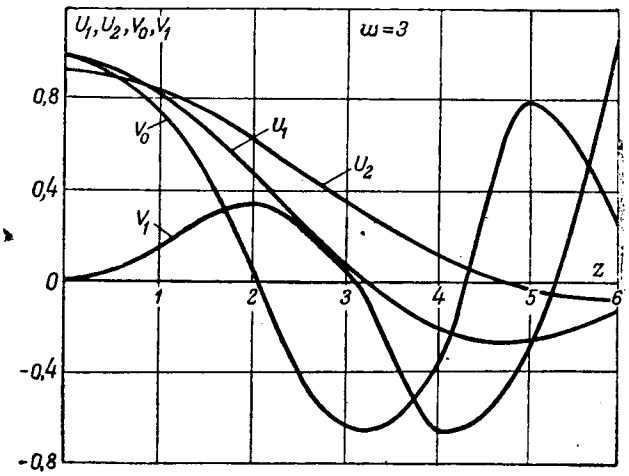


Рис. 4.

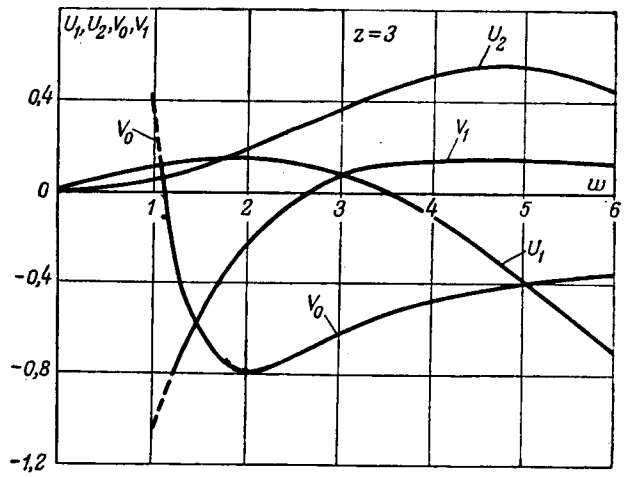


Рис. 5.

[1] Это определение функции $V_n(w, z)$ отличается от определения Ватсона [Л. 13] множителем $(-1)^n$.

$$U_{2n+1}(z, z) = V_{2n+1}(z, z) = \frac{(-1)^n}{2}\sin z - \sum_{m=0}^{n-1}(-1)^{n+m} J_{2m+1}(z). \quad (I,15)$$

Если $z = 0$, то при $n = 0, 1, 2, \ldots$ имеем следующие формулы:

$$U_{2n}(w, 0) = (-1)^n\left[\cos\frac{w}{2} - \sum_{m=0}^{n-1}\frac{(-1)^m\left(\frac{w}{2}\right)^{2m}}{(2m)!}\right]; \quad (I,16)$$

$$U_{2n+1}(w, 0) = (-1)^n\left[\sin\frac{w}{2} - \sum_{m=0}^{n-1}\frac{(-1)^m\left(\frac{w}{2}\right)^{2m+1}}{(2m+1)!}\right]; \quad (I,17)$$

$$V_0(w, 0) = 1; \quad V_{n+1}(w, 0) = 0. \quad (I,18)$$

Далее отметим следующие дифференциальные соотношения:

$$\frac{\partial U_n(w, z)}{\partial z} = -\frac{z}{w}U_{n+1}(w, z); \quad (I,19)$$

$$\frac{\partial^2 U_n(w, z)}{\partial z^2} = \left(\frac{z}{w}\right)^2 U_{n+2}(w, z) - \frac{1}{w}U_{n+1}(w, z); \quad (I,20)$$

$$2\frac{\partial U_n(w, z)}{\partial w} = U_{n-1}(w, z) + \left(\frac{z}{w}\right)^2 U_{n+1}(w, z); \quad (I,21)$$

$$\frac{\partial V_n(w, z)}{\partial z} = \frac{z}{w}V_{n-1}(w, z); \quad (I,22)$$

$$\frac{\partial^2 V_n(w, z)}{\partial z^2} = \left(\frac{z}{w}\right)^2 V_{n-2}(w, z) + \frac{1}{w}V_{n-1}(w, z); \quad (I,23)$$

$$2\frac{\partial V_n(w, z)}{\partial w} = V_{n+1}(w, z) - \left(\frac{z}{w}\right)^2 V_{n-1}(w, z). \quad (I,24)$$

Эти функции имеют следующие интегральные представления:

$$U_n(w, z) = \frac{w^n}{z^{n-1}}\int_0^1 J_{n-1}(zt)\cos\left[\frac{1}{2}w(1-t^2)\right]t^n dt; \quad (I,25)$$

$$U_{n+1}(w, z) = \frac{w^n}{z^{n-1}}\int_0^1 J_{n-1}(zt)\sin\left[\frac{1}{2}w(1-t^2)\right]t^n dt, \quad (I,26)$$

откуда

$$U_n(w, z) \pm jU_{n+1}(w, z) = \frac{w^n}{z^{n-1}}\int_0^1 J_{n-1}(zt)\exp\left[\pm\frac{1}{2}jw(1-t^2)\right]t^n dt. \quad (I,27)$$

Кроме того,

$$-jU_1\left(\frac{jz}{w}, z\right) + U_2\left(\frac{jz}{w}, z\right) = \frac{1}{2\pi j}\int_\gamma \frac{1}{t-w}\exp\left[\frac{z}{2}\left(t-\frac{1}{t}\right)\right]dt. \quad (I,28)$$

Здесь контур γ — окружность радиуса $r < |w|$, окружающая начало координат в положительном направлении.

Перейдем к рассмотрению цилиндрических функций от двух мнимых переменных, определив их соотношения:

$$\Upsilon_n(w, z) = j^{-n}U_n(jw, jz); \quad (I,29)$$

$$\Theta_n(w, z) = j^{-n}V_n(jw, jz). \quad (I,30)$$

Приняв во внимание формулы (I,1), (I,2) и соотношение $I_n(z) = j^{-n}J_n(jz)$, получим:

$$\Upsilon_n(w, z) = \sum_{m=0}^{\infty}\left(\frac{w}{z}\right)^{n+2m} I_{n+2m}(z); \quad (I,31)$$

$$\theta_n(w, z) = \sum_{m=0}^{\infty}\left(\frac{z}{w}\right)^{n+2m} I_{n+2m}(z). \quad (I,32)$$

Графики функций Υ_1, Υ_2, θ_0, θ_1 для $w = 3$ и для $z = 3$ приведены на рис. 6 и 7.

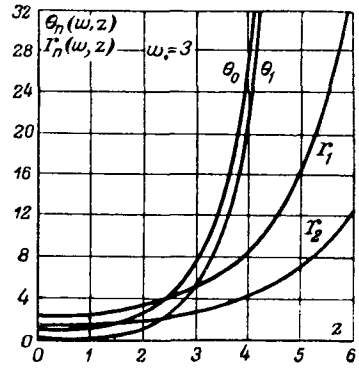


Рис. 6.

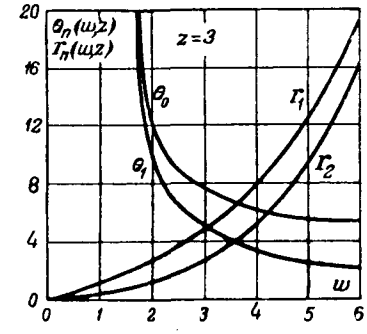


Рис. 7.

Из самого определения функций Υ_n и θ_1 вытекают соотношения

$$\Upsilon_n(w, z) - \Upsilon_{n+2}(w, z) = \left(\frac{w}{z}\right)^n I_n(z); \quad (I,33)$$

$$\theta_n(w, z) - \theta_{n+2}(w, z) = \left(\frac{z}{w}\right)^n I_n(z); \quad (I,34)$$

$$\Upsilon_n(w, z) = \theta_n\left(\frac{z^2}{w}, z\right); \quad (I,35)$$

$$\theta_n(w, z) = \Upsilon_n\left(\frac{z^2}{w}, z\right). \quad (I,36)$$

Далее заметим следующие соотношения:

$$\Upsilon_{2n+1}(w, z) + \theta_{-2n+1}(w, z) = \mathrm{sh}\left(\frac{w}{2} + \frac{z^2}{2w}\right); \quad (I,37)$$

$$\Upsilon_{2n+2}(w, z) + \theta_{-2n}(w, z) = \mathrm{ch}\left(\frac{w}{2} + \frac{z^2}{2w}\right). \quad (I,38)$$

В частности, при $n = 0$ имеем:

$$\Upsilon_1(w, z) + \theta_1(w, z) = \mathrm{sh}\left(\frac{w}{2} + \frac{z^2}{2w}\right); \quad (I,39)$$

$$\Upsilon_2(w, z) + \theta_0(w, z) = \mathrm{ch}\left(\frac{w}{2} + \frac{z^2}{2w}\right); \quad (I,40)$$

отсюда почленным сложением получим:

$$\Upsilon_1(w, z) + \Upsilon_2(w, z) + \theta_0(w, z) + \theta_1(w, z) = \exp\left(\frac{w}{2} + \frac{z^2}{2w}\right). \quad (I,41)$$

Отметим еще следующие дифференциальные соотношения:

$$\frac{\partial \Upsilon_n(w, z)}{\partial z} = \frac{z}{w}\Upsilon_{n+1}(w, z); \quad (I,42)$$

$$\frac{\partial^2 \Upsilon_n(w, z)}{\partial z^2} = \left(\frac{z}{w}\right)^2 \Upsilon_{n+2}(w, z) + \frac{1}{w}\Upsilon_{n+1}(w, z); \quad (I,43)$$

$$2\frac{\partial \Upsilon_n(w, z)}{\partial w} = \Upsilon_{n-1}(w, z) - \left(\frac{z}{w}\right)^2 \Upsilon_{n+1}(w, z); \quad (I,44)$$

$$\frac{\partial \theta_n(w, z)}{\partial z} = \frac{z}{w}\theta_{n-1}(w, z); \quad (I,45)$$

$$\frac{\partial^2 \theta_n(w, z)}{\partial z^2} = \left(\frac{z}{w}\right)^2 \theta_{n-2}(w, z) + \frac{1}{w}\theta_{n-1}(w, z); \quad (I,46)$$

$$2\frac{\partial \theta_n(w, z)}{\partial w} = \theta_{n+1}(w, z) - \left(\frac{w}{z}\right)^2 \theta_{n-1}(w, z). \quad (I,47)$$

Если $w = z$, то согласно формулам (I,31) и (I,32) получим:

$$\Upsilon_n(z, z) = \theta_n(z, z), \quad (I,48)$$

а из формул (I,37) и (I,38) следует:

$$\Upsilon_{2n}(z, z) = \frac{1}{2}[I_0(z) + \operatorname{ch} z] - \sum_{m=0}^{n-1} I_{2m}(z); \quad (I,49)$$

$$\Upsilon_{2n+1}(z, z) = \frac{1}{2}\operatorname{sh} z - \sum_{m=0}^{n-1} I_{2m+1}(z). \quad (I,50)$$

При $n = 0$ из формул (I,49) и (I,50) получаем:

$$\Upsilon_0(z, z) = \frac{1}{2}[I_0(z) + \operatorname{ch}(z)]; \quad (I,51)$$

$$\Upsilon_1(z, z) = \frac{1}{2}\operatorname{sh} z. \quad (I,52)$$

При $n = 1$ из формул (I,49) и (I,50) находим:

$$\Upsilon_2(z, z) = \frac{1}{2}[\operatorname{ch} z - I_0(z)]; \quad (I,53)$$

$$\Upsilon_3(z, z) = \frac{1}{2}\operatorname{sh} z - I_1(z). \quad (I,54)$$

Если $w \neq 0$, а $z = 0$, то из формулы (I,32) получим:

$$\theta_0(w, 0) = 1, \ \theta_n(w, 0) = 0 \ (n \geqslant 1), \quad (I,55)$$

а из формул (I,39) и (I,40) находим:

$$\Upsilon_1(w, 0) = \operatorname{sh}\frac{w}{2}, \ \Upsilon_2(w, 0) = \operatorname{ch}\frac{w}{2} - 1. \quad (I,56)$$

При $w = z = 0$ будем иметь:

$$\Upsilon_0(0, 0) = 1, \ \Upsilon_n(0, 0) = 0 \ (n \geqslant 1). \quad (I,57)$$

Приложение II. *О представлении одного контурного интеграла.* Рассмотрим контурный интеграл

$$\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma_1} F_1(u, R)\exp\left[\frac{z_1}{2}(au + b + R)\right] du; \quad (II,1)$$

здесь $F_1(u, R)$ — рациональная функция от u и

$$R = \sqrt{Au^2 + Bu + C};$$

z_1 — параметр;
a, b, A, B, C — некоторые постоянные;
γ_1 — замкнутый контур, содержащий все особые точки подинтегральной функции и не уходящий в бесконечность.

Интеграл (II,1) подстановкой Эйлера

$$t = \sqrt{A\frac{u - u_1}{u - u_2}} \quad (II,2)$$

приводится к виду:

$$e^{\frac{z_1}{2}(b + au_2)}\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma_2} F_2(t)\exp\frac{z_1}{2}(u_2 - u_1)\times$$

$$\times\left[\frac{\sqrt{A} - a}{2\sqrt{A}(t + \sqrt{A})} + \frac{\sqrt{A} + a}{2\sqrt{A}(t - \sqrt{A})}\right] dt, \quad (II,3)$$

где u_1 и u_2 — корни уравнения $Au^2 + Bu + C = 0$.

Для вычисления интеграла (II,3) сделаем дробно-линейное преобразование

$$v = \frac{t - \sqrt{A}}{t + \sqrt{A}}, \quad (II,4)$$

при его помощи особые точки $\sqrt{A}$ и $-\sqrt{A}$ переходят соответственно в начало координат и бесконечно удаленную точку. В этом случае интеграл (II,3) примет вид:

$$e^{\frac{z_1}{2}\left(b + \frac{a}{2}B\right)}\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma_3} F_3(v)\exp\frac{z_1}{2}\frac{u_2 - u_1}{4}\times$$

$$\times\left[(a - \sqrt{A})v + \frac{a + \sqrt{A}}{v}\right] dv. \quad (II,5)$$

Следовательно, все сводится к нахождению интеграла (II,5), который при помощи преобразования подобия

$$v = \varkappa w \quad (II,6)$$

принимает следующий вид:

$$e^{\frac{z_1}{2}\left(b + \frac{a}{2}B\right)}\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma} F(w)e^{\frac{z}{2}\left(w - \frac{1}{w}\right)} dw, \quad (II,7)$$

где

$$\varkappa = \sqrt{\frac{\sqrt{A} + a}{\sqrt{A} - a}}, \ \frac{z}{2} = \frac{z_1}{2}\frac{u_2 - u_1}{4}(\sqrt{A} - a)\varkappa.$$

Для вычисления интеграла

$$\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma} F(w)e^{\frac{z}{2}\left(w - \frac{1}{w}\right)} dw \quad (II,8)$$

представим рациональную функцию $F(w)$ в виде суммы простых дробей и целой части $P(w)$:

$$F(w) = P(w) + \sum_{s=1}^{k}\sum_{n=1}^{\nu_s}\frac{c_{ns}}{(w - w_s)^n}.$$

Тогда интеграл (II,8) распадается на сумму интегралов вида:

$$\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma}\frac{1}{w^{k+1}}e^{\frac{z}{2}\left(w - \frac{1}{w}\right)} dw, \quad (II,9)$$

$$\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma} w^l e^{\frac{z}{2}\left(w - \frac{1}{w}\right)} dw, \quad (II,10)$$

$$\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma}\frac{1}{(w - w_s)^{m+1}}e^{\frac{z}{2}\left(w - \frac{1}{w}\right)} dw, \quad (II,11)$$

где k, l, m — целые положительные числа или нули.

Интегралы (II,9) равны функциям Бесселя [Л. 5], если контур γ окружает начало координат в положительном направлении, т. е.

$$\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma}\frac{1}{w^{k+1}}e^{\frac{z}{2}\left(w-\frac{1}{w}\right)}dw=J_k(z). \qquad (II,12)$$

Интегралы (II,10) подстановкой $w=1/v$ преобразуются следующим образом:

$$\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma}w^l e^{\frac{z}{2}\left(w-\frac{1}{w}\right)}dw=\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma}\frac{1}{v^{l+2}}e^{-\frac{z}{2}\left(v-\frac{1}{v}\right)}dv=$$

$$=J_{l+1}(-z)=(-1)^{l+1}J_{l+1}(z). \qquad (II,13)$$

Интеграл (II,11) при $m=0$ имеет вид:

$$\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma}\frac{1}{w-w_s}e^{\frac{z}{2}\left(w-\frac{1}{w}\right)}dw. \qquad (II,14)$$

Использовав интегральные представления цилиндрической функции от двух переменных (приложение I), получим:

$$\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma}\frac{1}{w-w_s}e^{\frac{z}{2}\left(w-\frac{1}{w}\right)}dw=$$

$$=e^{\frac{z}{2}\left(w_s-\frac{1}{w_s}\right)}-jU_1\left(\frac{jz}{w_s},\ z\right)+U_2\left(\frac{jz}{w_s},\ z\right), \qquad (II,15)$$

где контур γ — окружность радиуса $r>|w_s|$. Случай $m\geqslant 1$ можно свести к предыдущему при помощи интегрирования по частям или дифференцированием по параметру [Л. 4].

Таким образом, интеграл (II,1) выражается через цилиндрические функции от двух и одной переменных.

Литература

1. В. И. Коваленков. Устанавливающиеся электромагнитные процессы вдоль проводных линий. Издательство Академии наук СССР, 1945.
2. К. А. Круг. Переходные процессы в линейных электрических цепях, Госэнергоиздат, 1948.
3. В. А. Диткин и П. И. Кузнецов. Справочник по операционному исчислению, ГИТТЛ, 1951.
4. П. И. Кузнецов. О представлении одного контурного интеграла, ПММ, т. XI, 1947.
5. Р. О. Кузьмин. Бесселевы функции, ОНТИ, 1935.
6. П. И. Кузнецов. Функции Ломмеля от двух мнимых аргументов. ПММ, т. XI, 1947.
7. П. И. Кузнецов. Распространение электромагнитных волн вдоль линии. ПММ, т. XI, 1947.
8. В. Н. Кузнецов. Устанавливающиеся электромагнитные процессы в проводных линиях бесконечной длины при включении переменного тока. Сборник научных работ по проводной связи, № 2. Издательство Академии наук СССР, 1953.
9. П. И. Кузнецов. Распространение электромагнитных волн вдоль двух параллельных однопроводных линий. ПММ, т. XII, 1948.
10. П. И. Кузнецов. Распространение электромагнитных волн в многопроводной системе. УМН, т. IV, 1949.
11. E. Lommel. Die Beugungserscheinungen einer kreisrunden Öffnung und eines kreisrunden Schirmchens theoretisch und experimentell bearbeitet. Münchener. Abh. 1884—1886, Bd. XV (S. 233—328).
12. E. Lommel. Die Beugungserscheinungen geradlinig begrenzter Schirme. Münchener. Abh. 1884—1886, Bd. XV (S. 531—663).
13. Г. Н. Ватсон. Теория бесселевых функций. Издательство иностранной литературы, 1949.
14. Э. Грей и Г. Мэтьюз. Функции Бесселя и их приложения к физике и механике. Издательство иностранной литературы, 1949.

[2. 10. 1952]

◇ ◇ ◇

Вопросы теории саморегулирования при сварке плавящимся электродом

Кандидат техн. наук Г. М. КАСПРЖАК
Инж. Л. Е. АЛЕКИН

Секция электросварки и электротермии Академии наук СССР

Описывается структура процесса саморегулирования дуги при сварке плавящимся металлическим электродом с независимой скоростью подачи электродной проволоки и излагается методика анализа и расчета этого способа автоматического регулирования. Вводятся понятия о коэффициентах усиления и постоянных времени звеньев и цепей саморегулирования и находятся выражения передаточных функций системы при возмущениях со стороны напряжения сети. Даются рекомендации к повышению качества процесса саморегулирования. На конкретном примере иллюстрируется практическое значение предлагаемой методики и на основе опыта оценивается точность расчета.

Процесс саморегулирования и его изучение. Автоматическая дуговая сварка плавящимся электродом с независимой или постоянной скоростью подачи электродной проволоки получила в Советском Союзе весьма широкое распространение после осуществления в 1942 г. В. И. Дятловым сварочного автомата, работающего по принципу саморегулирования [Л. 1], заключающемуся в таком самопроизвольном изменении скорости плавления электрода при реально возможных возмущениях, благодаря которому параметры дуги отклоняются от заданной величины незначительно и режим сварки остается стабильным.

Практическое применение принципа автоматического регулирования дуги путем саморегулирования чрезвычайно упростило схемы электрооборудования сварочных головок.

Вместо замкнутых, часто довольно сложных, систем принудительного регулирования стало возможным применение простых регулируемых электроприводов.

На рис. 1 изображены две схемы принудительного регулирования [Л. 2]: широко применяемая схема автоматического регулирования напряжения дуги (рис. 1,*а*), воздействующая на положение неплавящегося электрода или скорость пода-

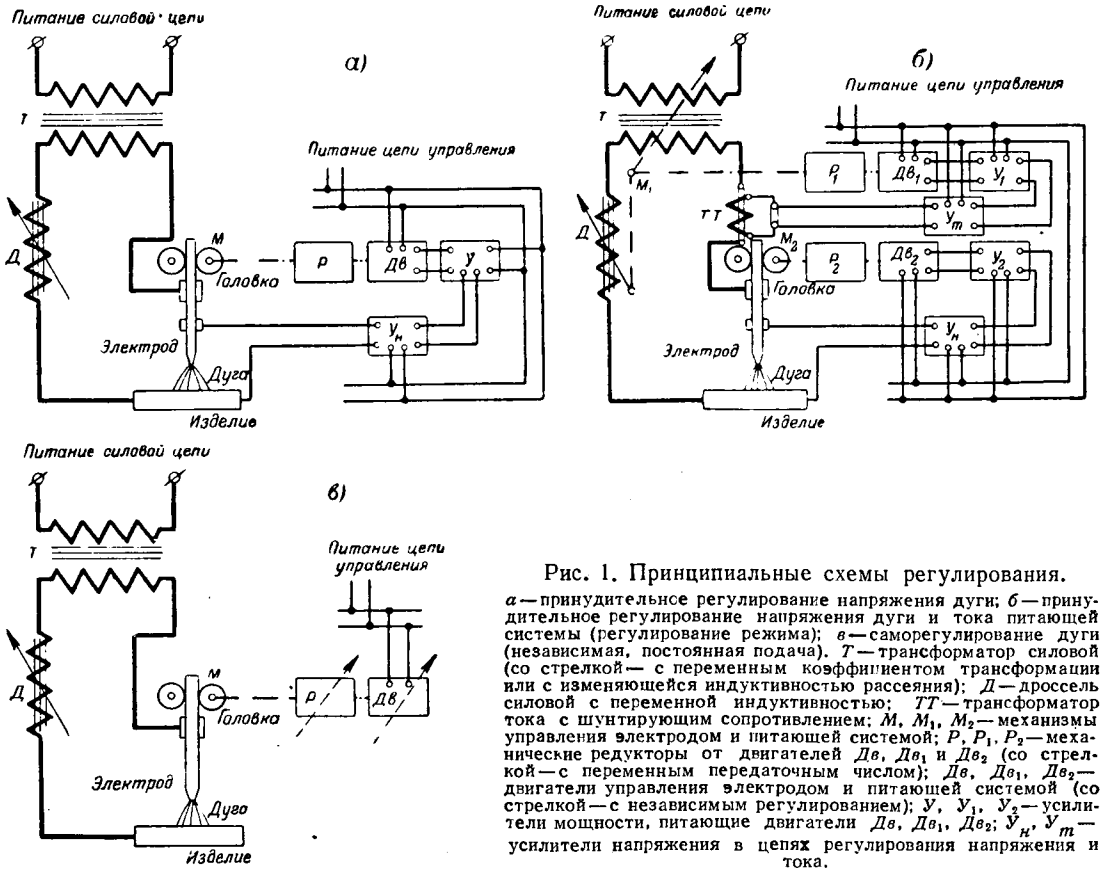


Рис. 1. Принципиальные схемы регулирования.

а — принудительное регулирование напряжения дуги; *б* — принудительное регулирование напряжения дуги и тока питающей системы (регулирование режима); *в* — саморегулирование дуги (независимая, постоянная подача). *Т* — трансформатор силовой (со стрелкой — с переменным коэффициентом трансформации или с изменяющейся индуктивностью рассеяния); *Д* — дроссель силовой с переменной индуктивностью; *ТТ* — трансформатор тока с шунтирующим сопротивлением; *М*, M_1, M_2 — механизмы управления электродом и питающей системой; *Р*, P_1, P_2 — механические редукторы от двигателей *Дв*, $Дв_1$ и $Дв_2$ (со стрелкой — с переменным передаточным числом); *Дв*, $Дв_1$, $Дв_2$ — двигатели управления электродом и питающей системой (со стрелкой — с независимым регулированием); *У*, $У_1$, $У_2$ — усилители мощности, питающие двигатели *Дв*, $Дв_1$, $Дв_2$; $У_н$, $У_т$ — усилители напряжения в цепях регулирования напряжения и тока.

чи плавящегося электрода в функции напряжения дуги, и одна из не получивших еще значительного распространения схем регулирования режима сварки (рис. 1,*б*) за счет автоматического регулирования напряжения дуги и тока сварки путем воздействия на один из элементов питающей системы в функции сигнала от трансформатора тока. На этом же рисунке (рис. 1,*в*) приведена значительно более простая схема независимой, постоянной подачи электрода, при которой поддержание режима сварки плавящимся электродом осуществляется только за счет саморегулирования.

В случае принудительного регулирования задача схемы управления состоит в автоматическом регулировании и настройке режима сварки; при саморегулировании — только в настройке режима сварки. При принудительном регулировании режима сварки настройка производится за счет изменения задающих напряжений, сравниваемых в измерительных органах с регулируемыми величинами; в случае регулирования напряжения — за счет изменения задающего параметра и изменения индуктивности сварочной цепи; наконец, в случае саморегулирования — путем изменения скорости подачи электрода (своеобразного задающего параметра) и изменения индуктивности сварочной цепи.

Небольшая мощность, необходимая для привода подачи электрода (около 100 *вт*), и в большинстве случаев невысокие требования к плавности и точности регулирования позволили использовать для автоматов и полуавтоматов, оборудованных головками (рис. 1) для постоянной подачи, ряд технических решений, отличающихся способом регулирования скорости. В настоящее время находят применение следующие варианты регулируемых приводов для саморегулирующихся головок: 1) асинхронный привод с регулированием скорости путем ступенчатого изменения передаточного числа механического редуктора; 2) асинхронный привод с плавным изменением передаточного числа механической передачи с помощью вариатора; 3) привод постоянного тока с машиной независимого возбуждения, регулируемой путем изменения напряжения на якоре при помощи автотрансформатора с переменным коэффициентом трансформации или особого генератора с регулируемым возбуждением. Ряд специальных, очень простых схем регулируемых приводов находится в стадии освоения.

Большая и плодотворная работа коллектива Института электросварки им. Е. О. Патона Академии наук УССР, ЦНИИТМАШ и ряда заводов машиностроения по развитию и распространению этого нового вида автоматической сварки привела к тому, что он вскоре стал одним из основных способов сварки конструкций в промышленности. Применение принципа автоматического регулирования дуги путем саморегулирования позволило еще в годы Великой Отечественной войны в очень короткий срок дать нашей промышленности значительное количество весьма простых и надежных в эксплуатации автоматов.

В настоящее время среди сварщиков часто ставится вопрос о том, по какому пути должно пойти регулирование дуги при сварке: по пути развития и усовершенствования систем принудительного регулирования одного из энергетических параметров, регулирования режима сварки или, наконец, по пути усовершенствования и развития систем, работающих по принципу саморегулирования. Вопрос о сопоставлении свойств различных типов систем регулирования процесса дуговой сварки и их практического применения решается в настоящее время путем сравнения конкретных систем, которым всегда присущи индивидуальные особенности. Такое сравнение не дает возможности иметь объективное суждение о преимуществах и недостатках систем различного типа. Действительно объективное суждение по этому вопросу может быть составлено лишь путем сравнительного изучения характерных структурных особенностей систем методами современной теории регулирования. Следовательно, назрела необходимость овладения методикой анализа и расчета систем саморегулирования, которая исходила бы из тех же предпосылок, что и методика анализа и расчета систем принудительного регулирования процесса сварки [Л. 2] и оперировала бы при этом общими методами анализа и критериями качества регулирования. Это необходимо еще и потому, что в опубликованных работах по саморегулированию дуги [Л. 4, 5] явления рассматривались весьма упрощенно, вследствие чего многие существенные вопросы оказывались вне поля зрения исследователя и конструктора.

К таким вопросам относятся прежде всего:

1) взгляд на процесс саморегулирования, как на явление, обусловленное только изменением скорости плавления при отклонении тока дуги от номинального значения; в действительности же изменение скорости плавления связано также с зависимостью ее от отклонения напряжения дуги и глубины проплавления в процессе сварки;

2) предположение, противоречащее современной теории процессов распространения тепла при сварке [Л. 3], что тепловые процессы в электроде протекают безинерционно, а также, что инерционность процесса проплавления изделия не влияет на скорость и характер процесса саморегулирования;

3) изучение саморегулирования без учета того, что в процессе сварки система подвергается многим возмущениям, различным по характеру и точке приложения, и что параметры системы зависят от режима сварки. Эти допущения не могли не привести к большим неточностям при расчете и даже при качественном анализе явлений.

При анализе устройств для автоматического регулирования дуги могут быть поставлены следующие задачи: 1) определение устойчивости системы и, если она устойчива, изучение характера и продолжительности процесса регулирования; 2) определение статических ошибок; 3) определение стабильности процесса сварки при воздействии на систему периодических возмущений [Л. 11] из-за колебаний длины дуги, связанных

с ее блужданием или процессом плавления электрода. Для саморегулирующихся систем наиболее существенным является определение характера и продолжительности переходного процесса и вычисление статических ошибок. Решение этих двух вопросов производится ниже путем составления структурной схемы процесса саморегулирования, вычисления по структурной схеме передаточной функции и, наконец, получения из передаточной функции зависимостей, характеризующих динамические и статические свойства систем саморегулирования [Л. 2, 6].

Структурная схема процесса саморегулирования. Структурная схема процесса саморегулирования (рис. 2) представляет собой замкнутую систему, звенья которой отображают свойства элементов системы (дуги, электрода, питающей системы, шва), проявляющиеся в процессе регулирования при автоматической сварке. В структурную схему саморегулирования входят звенья трех типов: простое, интегрирующее и инерционное. Передаточные функции этих звеньев приведены на структурной схеме (рис. 2). Наименование, физический смысл и размерность коэффициентов усиления и постоянных времени приведены в приложении II и подробнее — в предыдущих работах авторов [Л. 9]. Некоторых дополнительных пояснений требует лишь звено *XI*, изображенное на рис. 2 пунктиром. В отличие от других, органически входящих в структурную схему, оно введено искусственно для того, чтобы отобразить возмущение со стороны напряжения сети $\tilde{u}_c$ в виде эквивалентного возмущения со стороны напряжения дуги $\tilde{u}_c'$ [Л. 2]. Также искусственно введено так называемое единичное звено *1*; при наличии этого звена ряд эквивалентных преобразований структурной схемы (см. ниже) становится нагляднее.

К ряду участков схемы приложены возмущения. Для системы саморегулирования можно назвать пять таких реально возможных возмущений. Наименование, физический смысл и размерность возмущений приведены в приложении III. Перечисленные возмущения могут различно изменяться во времени, но мы ограничимся на первых порах рассмотрением возмущений только ступенчатого характера.

Как видно из рис. 2, при изображении звеньев учитываются знаки передаточных функций; при изображении возмущений этого не сделано. Поэтому в дальнейших выводах необходимо учитывать, что положительными следует считать возмущения, приводящие к удлинению дуги.

Если не принимать во внимание звенья *VIII*, *IX* и *XI*, не входящие в замкнутые контуры регулирования, то из рис. 2 можно видеть, что структурная схема состоит из следующих цепей: цепи *0—1—2—3—4—5*; цепи *5—6—7—8—9—10*; цепи *5—12—13—10*; цепи *8—14—3*; цепи *12—14—3* и дополнительной цепи *10—11—0*. Первая из этих цепей является цепью объекта регулирования в узком смысле слова: она отображает преобразование результирующей скорости конца электрода $v = v_э + \tilde{v}_n + \tilde{v}_э + \tilde{v}_д$ в напряжение дуги,

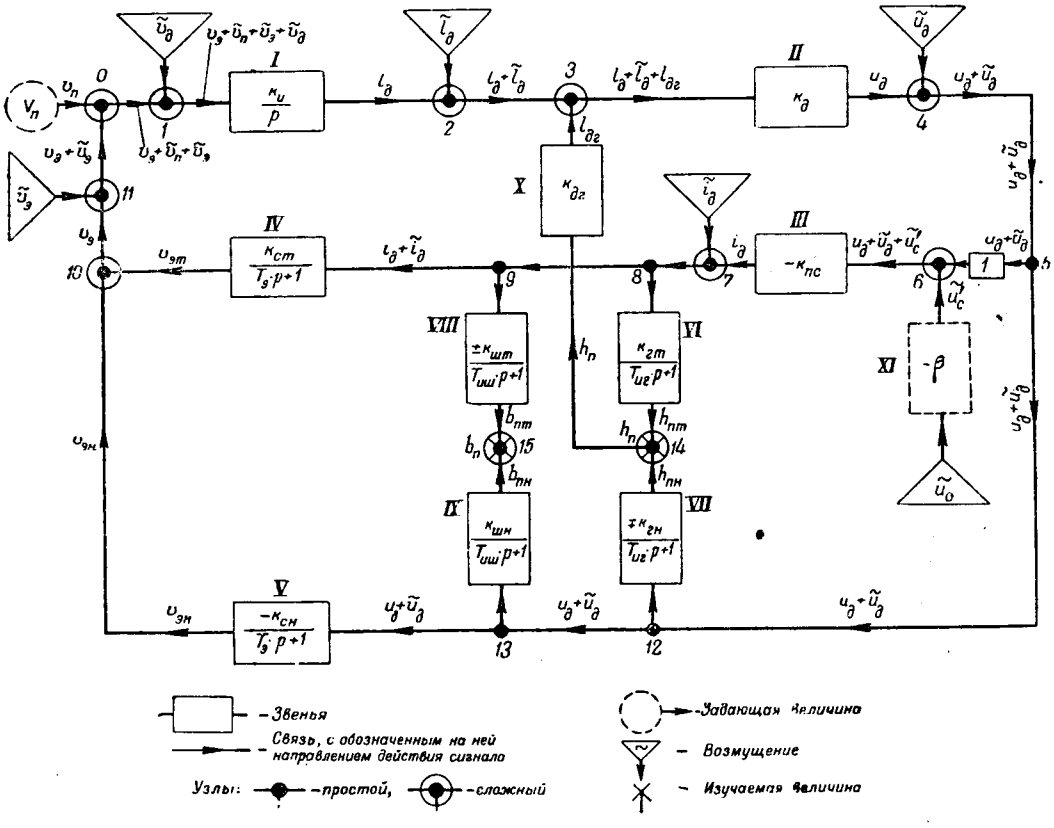


Рис. 2. Структурная схема процесса саморегулирования.

т. е. явления, происходящие только в самой дуге. Вторая цепь, как и все остальные, принадлежит уже к объекту регулирования в широком смысле слова: она отображает свойство электрода изменять скорость плавления $v_{эт}$ вследствие изменения тока дуги $i_д$. Третья цепь отображает свойство электрода изменять скорость плавления $v_{эн}$ из-за изменения только напряжения дуги $u_д$. Четвертая и пятая цепи отображают отклонения длины дуги $l_д$, обусловленные изменениями глубины проплавления $h_п$, вызываемыми соответственно изменением тока $i_д$ или напряжения дуги $u_д$. Дополнительная, шестая, цепь *10 — 11—0* описывает связь между дугой и системой в целом с учетом воздействия на систему постоянной скорости электродвигателя подачи электрода $V_п$, являющейся в данном случае задающим параметром.

Таким образом, по своей структуре система саморегулирования состоит как бы из четырех одновременно и параллельно действующих контуров регулирования: контура *0—1—2—3—4—5—6—7—8—9—10—11—0* и контура *0—1—2—3—4—5—12—13—10—11—0*, а также контура *3—4—5—6—7—8—14—3* и контура *3—4—5—12—14—3*. Эти контуры можно сгруппировать попарно по двум признакам: по составу и по регулируемой величине. По составу два первых контура отличаются от двух вторых контуров наличием в них интегрирующего звена *I*. Как известно, свойства таких контуров существенно отличаются от свойств контуров, не содержащих интегрирующих звеньев [Л. 7]. Первые из них характеризуют возможность получения статических, а вторые — астатических режимов регулирования. По регулируемой величине первый и третий контуры являются контурами регулирования тока, а второй и четвертый — контурами регулирования напряжения.

Следовательно, рассмотрение системы саморегулирования, как замкнутой системы убеждает нас в том, что этот процесс: 1) не является по своему характеру чисто астатическим процессом регулирования и 2) представляет собой не только процесс регулирования тока, но и регулирования напряжения. Как будет видно ниже, наличие не одного, а нескольких возмущений еще больше усложняет явления.

Передаточные функции системы и общие выражения для анализа процесса саморегулирования. Анализ выполняется по описанной выше структурной схеме, в которой полагается $T_э = 0$. Любая система саморегулирования, характеризуемая двумя регулируемыми величинами и пятью возможными возмущениями, описывается, таким образом, десятью передаточными функциями. Найдем две наиболее существенные из них: передаточную функцию от возмущения со стороны напряжения сети к напряжению дуги и от напряжения сети к току дуги. Для нахождения передаточных функций применим ряд специальных приемов, частично известных из литературы [Л. 7], частично разработанных в Секции электросварки [Л. 6]. Приемы заключаются в эквивалентном приведении цепей и эквивалентном переносе узлов изучаемой структурной системы.

В данном случае производим следующие эквивалентные преобразования исходной структурной схемы: 1) исключаем из рассмотрения все возмущения, кроме возмущения со стороны напряжения сети $\tilde{u}_c$, а также технологические звенья *VIII* и *IX*, не оказывающие влияния на процесс саморегулирования, и безинерционное звено *X* с коэффициентом $k_{дг}$, близким к единице; 2) цепи *8—14—3* и *12—14—3* разделяем и переносим из точки структурной схемы с величиной $l_д$ в точки с величинами $v_{эт}$ и $v_{эн}$; 3) возмущение со стороны напряжения сети $\tilde{u}_c$ заменяем эквивалентным возмущением со стороны напряжения дуги $u'_c = \frac{\tilde{u}_c}{\cos\varphi}$ [Л.2], исключая при этом звено *XI*.

Перечисленные изменения исходной структурной схемы (рис. 2) отображены на преобразованной схеме (рис. 3), на которой пунктирными линиями показаны участки цепей, полученные в результате переноса узлов. На рис. 3 звенья *XII* и *XIII* представляют собой искусственные дифференцирующие звенья; узлы *3'* и *3''* — искусственные узлы.

Из преобразованной эквивалентной схемы может быть получена передаточная функция замкнутой системы следующего вида [Л. 6, 7]:

$$W_{\tilde{u}'_c u_д} = \frac{W_э}{1 - W_э \cdot 1}. \qquad (1)$$

Здесь $W_э$ представляет собой эквивалентную передаточную функцию разомкнутой системы (рис. 3). Эта эквивалентная передаточная функция, в свою очередь, может быть найдена путем эквивалентного преобразования цепей со звеньями *III—IV—VI—XII*, *I—II* и *V—VII—XIII*, из которых вторая и третья цепи подключены антипараллельно друг другу и последовательно первой [Л. 6, 7]. Следовательно,

$$W_э = W_{III-XII} \frac{W_{I-II}}{1 - W_{I-II} W_{V-XIII}}, \qquad (2)$$

где индексы при передаточных функциях W обозначают цепи, которые этими функциями отображаются. Таким образом, из (1) и (2) имеем:

$$W_{u'_c u_д} = \frac{\dfrac{W_{I-II}}{1 - W_{I-II} W_{V-XIII}}}{1 - W_{III-XII} \dfrac{W_{I-II}}{1 - W_{I-II} W_{V-XIII}}} = \frac{W_{I-II} W_{III-XIII}}{1 - W_{I-II}(W_{III-XII} + W_{V-XIII})}. \qquad (3)$$

Выразив, далее, передаточные функции цепей через передаточные функции входящих в них звеньев

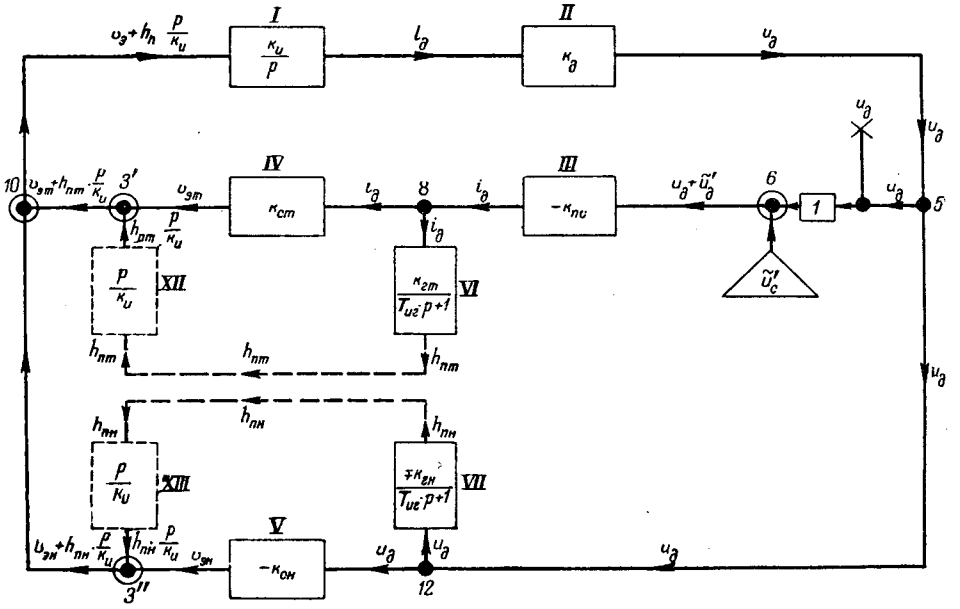


Рис. 3. Преобразованная структурная схема процесса саморегулирования.
Условные обозначения те же, что на рис. 2.

[Л. 6, 7], учтя при этом знаки их коэффициентов, получим следующие операторные выражения:

$$W_{\text{I-II}} = \frac{k_u}{p} k_\partial;\ W_{\text{III-XII}} = $$

$$= -k_{nc}\left[k_{cm} + \frac{k_{zm}}{T_{uz}p + 1} \cdot \frac{p}{k_u}\right]$$

и

$$W_{\text{V-XIII}} = -k_{cn} \mp \frac{k_{zn}}{T_{uz}p + 1} \cdot \frac{p}{k_u}.$$

Подставив значения передаточных функций цепей в уравнение (3), учтя, что $k_u = 1$, и обозначив

$$k_\partial k_{nc} k_{cm} = K_{cm},\ k_\partial k_{cn} = K_{cn},\ K_{cm} + K_{cn} = K_c$$

и

$$k_\partial k_{nc} k_{zm} = K_{zm},\ k_\partial k_{zn} = K_{zn},\ K_{zm} + K_{zn} = K_z,$$

после ряда преобразований получим:

$$W_{u_c' u_\partial} = -\frac{(K_{cm}T_{uz} + K_{zm})p + K_{cm}}{T_{uz}p^2 + (K_c T_{uz} + K_z + 1)p + K_c}. \quad (4)$$

При выводе передаточной функции $W_{u_c' u_\partial}$ учтено, что коэффициенты k_{nc}, k_{cn} и k_{zn} отрицательны. Знакопеременным является лишь коэффициент k_{zn}: при напряжении дуги выше 30 *в* его также следует полагать отрицательным.

Статические и динамические свойства системы саморегулирования могут быть изучены, как известно, по оригиналу операторного изображения изучаемой величины, который при ступенчатом возмущении $\tilde{z}$ согласно теории интегральных вычетов [Л. 7, 8] равен:

$$Y(t) = \sum_{k=1}^{k=3} \frac{M(p_k)\, e^{p_k t}}{\left|\frac{d}{dp}[pN(p)]\right|_{p_k}} \tilde{z}, \quad (5)$$

где $M(p_k)$ — числитель передаточной функции при данном значении корня p_k уравнения $pN(p) = 0$;

$N(p)$ — знаменатель передаточной функции;

$\frac{d}{dp}[pN(p)]_{p_k}$ — производная произведения $pN(p)$ при данном значении корня p_k уравнения $pN(p) = 0$;

t — координата времени;

e — основание натуральных логарифмов.

В нашем случае уравнение $pN(p) = 0$ имеет три корня: p_0, p_1 и p_2. Первый корень $p_0 = 0$; два остальных корня p_1 и p_2 находятся из характеристического уравнения $N(p) = 0$, полученного путем приравнивания нулю знаменателя выражения (4). Следовательно, выражение для отклонения напряжения дуги от номинального значения выглядит в развернутом виде следующим образом:

$$u_\partial(t) = -\left[\frac{K_{cm}}{K_c} + \right.$$

$$+ \frac{(K_{cm}T_{uz} + K_{zm})p_1 + K_{cm}}{3T_{uz}p_1^2 + 2(K_c T_{uz} + K_z + 1)p_1 + K_c} e^{p_1 t} +$$

$$\left. + \frac{(K_{cm}T_{uz} + K_{zm})p_2 + K_{cm}}{3T_{uz}p_2^2 + 2(K_c T_{uz} + K_z + 1)p_2 + K_c} e^{p_2 t}\right] \tilde{u}_c'. \quad (6)$$

Первый член этой формулы равен установившемуся значению $u_\partial(t)$, т. е. статической ошибке Δu_∂. Остальные два члена формулы (6) описывают переходный процесс.

Аналогичным образом можно получить передаточную функцию и расчетные выражения для тока дуги. Приводим их ниже без вывода.

Передаточная функция:

$$W_{u_c' i_\partial} = -\frac{k_{nc}[T_{uz}p^2 + (K_{cn}T_{uz} \pm K_{zn} + 1)p + K_{cn}]}{T_{uz}p^3 + (K_c T_{uz} + K_z + 1) + K_c}. \quad (7)$$

Общее решение в развернутом виде:

$$i_д(t) = -\left[\frac{K_{сн}}{K_c} + \right.$$

$$+\frac{T_{иг}p_1^2 + (K_{сн}T_{иг} \pm K_{гн} + 1)\,p_1 + K_{сн}}{3T_{иг}p_1^2 + 2(K_cT_{иг} + K_г + 1)p_1 + K_c} e^{p_1 t} +$$

$$\left. + \frac{T_{иг}p_2^2 + (K_{сн}T_{иг} \pm K_{гн} + 1)p_2 + K_{сн}}{3T_{иг}p_2^2 + 2(K_cT_{иг} + K_г + 1)p_2 + K_c} e^{p_2 t}\right] k_{пс}\tilde{u}_c'. \quad (8)$$

Анализ расчетных выражений. Основными расчетными выражениями являются формулы (6) и (8).

Расчетные формулы для других возмущений не приводятся; выводы и расчеты показывают, что характер и продолжительность переходного процесса при любом ступенчатом возмущении могут быть определены с достаточной для практики точностью по найденным выражениям (6) и (8).

Иначе обстоит дело со статическими ошибками. При возмущениях другого характера, чем изменение напряжения сети, расчет следует производить по выражениям из таблицы, в которой даются без вывода значения так называемых статических коэффициентов — первых членов таких выражений для $u_д$ и $i_д$ для $\tilde{z}_c' = 1$ [Л. 2] при всех реально возможных возмущениях. Для вычисления по таблице значений статических ошибок по напряжению дуги $\Delta u_д$ или току дуги $\Delta i_д$ нужно умножить соответствующий статический коэффициент на величину возмущения, считая положительным увеличение возмущаемой величины, а отрицательным — ее уменьшение. Знаки статических коэффициентов следует брать в соответствии с таблицей, причем верхние знаки в первой графе таблицы относятся к возмущениям по скорости плавления электрода $\tilde{v}_э$ и по профилю $\tilde{v}_д$ (сварка на подъем, сварка на спуск), а нижние — к возмущению по скорости подачи электрода $\tilde{v}_п$.

В соответствии с тем, что при выводе расчетных выражений знаки коэффициентов звеньев уже учтены (см. выше), вычисления статических коэффициентов следует производить по абсолютным значениям коэффициентов (приложение I). Этого же правила в большинстве случаев необходимо придерживаться при изучении переходных процессов; лишь при сварке при напряжении дуги, меньшем 30 *в*, в расчетные выражения следует подставлять коэффициент $K_{гн}$ со знаком минус.

Анализ полученных в статье зависимостей приводит нас к выводу о том, что увеличение коэффициентов K_c и $K_г$ дает ускорение, а увеличение постоянной времени $T_{иг}$, наоборот, замедление процесса регулирования. Следовательно, для улучшения динамических свойств процесса саморегулирования нужно стремиться к большим значениям K_c и $K_г$, причем основное внимание следует обратить на увеличение коэффициента K_c. Влиять же на скорость процесса саморегулирования изменением параметра $T_{иг}$ практически почти невозможно, так как его значение зависит главным образом от теплофизических свойств и размеров свариваемого изделия, а также от скорости сварки [Л. 3].

При расчете систем саморегулирования следует иметь в виду, что параметр

$$K_c = K_{ст} + K_{сн};$$

в свою очередь,

$$K_{ст} = k_д k_{пс} k_{ст}, \quad \text{а} \quad K_{сн} = k_д k_{сн}.$$

Но так как $k_д$ и $k_{сн}$ изменяются в сравнительно малых пределах, то скорость процесса саморегулирования может управляться лишь изменением коэффициентов $k_{пс}$ и $k_{ст}$, приобретая, следовательно, наибольшие значения при пологих внешних характеристиках источника питания [Л. 2] и больших плотностях тока. Как показывают расчеты, изменение произведения коэффициентов $k_{пс}$ и $k_{ст}$ в практически возможных случаях настолько значительно, что скорость процесса может изменяться в несколько раз.

Анализ характеристического уравнения показывает, что при $T_э = 0$ характер процесса саморегулирования практически всегда будет экспоненциальным. Вопрос о влиянии на характер процесса регулирования постоянной времени $T_э$ сейчас еще до конца не разрешен. Возможно, что при некоторых режимах оно и существенно.

Из выражений, приведенных в таблице, следует, что в статике режимы работы можно разбить на две принципиально различные группы: к первой из них относятся режимы с возмущениями по длине $\tilde{l}_д$ и напряжению дуги $\tilde{u}_д$; ко второй — режимы с возмущениями по скорости $\tilde{v}$, току дуги $i_д$ и напряжению сети $\tilde{u}_c$. При возмущениях первой группы происходит полная отра-

Статические коэффициенты

Изучаемая величина	Возмущаемая величина	Скорость конца электрода $\tilde{v}_п$; $\tilde{v}_э$; $\tilde{v}_д$	Длина дуги $\tilde{l}_д$	Напряжение дуги $\tilde{u}_д$	Ток дуги $\tilde{i}_д$	Напряжение сети $\tilde{u}_c$
	Напряжение дуги $u_д$	$\pm\frac{K_{сн}}{K_c}\cdot\frac{1}{k_{сн}}$	0	0	$\frac{K_{ст}}{K_c}\cdot\frac{1}{k_{пс}}$	$\frac{K_{ст}}{K_c}\cdot\frac{1}{\cos\varphi}$
	Ток дуги $i_д$	$\mp\frac{K_{ст}}{K_c}\cdot\frac{1}{k_{ст}}$	0	0	$\frac{K_{сн}}{K_c}$	$\frac{K_{сн}}{K_c}\cdot\frac{k_п}{\cos\varphi}$

ботка ошибки (астатические режимы); при возмущениях второй группы системы работают со статическими ошибками (статические режимы). Режимы с возмущениями второй группы, в свою очередь, могут быть разбиты на две подгруппы: к первой из них относятся режимы с возмущениями по скорости; ко второй — режимы с возмущениями по току дуги и напряжению сети. Такая разбивка на подгруппы соответствует двум различным характерам отработки ошибок: значительной отработке напряжения дуги $u_д$ — в первом случае и преимущественной отработке тока дуги $i_д$ — во втором случае.

Изложенная выше методика анализа систем саморегулирования позволяет производить расчет конкретных систем при конструировании и сопоставление свойств систем саморегулирования и принудительного регулирования. Наиболее существенными вопросами, нуждающимися в скорейшем разрешении, являются, например, следующие: выбор регулируемого привода для постоянной подачи электрода, исходя из допустимой жесткости механической характеристики (существенно при конструировании шланговых автоматов и полуавтоматов); изучение специфических особенностей саморегулирования для случаев сварки при высоких плотностях тока и сопоставление свойств процесса саморегулирования со свойствами чувствительных систем принудительного регулирования (важно при конструировании новых современных автоматов); сопоставление свойств процесса саморегулирования при нормальных плотностях тока со свойствами системы принудительного регулирования напряжения дуги автомата АДС-1000 и АДШ-500 (важно для технологов при выборе типа автомата); решение вопроса о возможности применения саморегулирования в условиях изменения напряжения сети и составление технических условий на дополнительные устройства для регулирования в тех случаях, когда саморегулирование не может обеспечить необходимого качества сварки (существенно для конструкторов и технологов) и т. д.

В приложении I дается применение изложенной методики расчета для решения последнего из перечисленных выше вопросов.

Приложение I. *Исследование влияния изменения напряжения сети на отклонения размеров сварного шва.* Произведем оценку технологического воздействия такого вида возмущения на сварной шов путем определения статических ошибок по напряжению $\Delta u_д$ и току $\Delta i_д$, а также глубине $\Delta h_п$ и ширине $\Delta b_п$ проплавления для конкретного случая сварки в условиях изменяющегося напряжения сети; построим также кривые переходных процессов $u_д(t)$ и $i_д(t)$ для этого же случая, определим начальную ошибку по току (при $t=0$) и найдем изменение глубины проплавления $h_п(t)$ во время переходного процесса.

В качестве примера выберем, по возможности, наиболее типовой случай автоматической сварки: рассмотрим наплавку валика на пластину из стали 3 толщиной 22 *мм* электродной проволокой из малоуглеродистой стали диаметром 5 *мм* при нормальной плотности тока; напряжение холостого хода трансформатора для большей устойчивости дуги при экспериментах выберем повышенным до $U_0=77$ *в*; сварку производим под флюсом ОСЦ-45. Задаемся наибольшим возможным изменением напряжения сети, равным 15%, т. е. величиной, значительно превосходящей допустимые по нормам значения.

В соответствии с поставленной технологической задачей выберем следующий режим: ток дуги $I_д=800$ *а*, напряжение дуги $U_д=33$ *в*, скорость сварки $V_с=30$ *м/час*. Возмущение со стороны напряжения сети $\tilde{U}_с=11{,}5$ в $(0{,}15U_0)$ создадим путем включения специального вольтодобавочного трансформатора на напряжение 11,5 *в* и рабочий ток 800 *а*.

Покажем на этом примере, как путем изложенных в статье приемов расчета можно исследовать важный для практики вопрос о влиянии на качество сварного соединения изменения напряжения сети. Одновременно с этим оценим точность расчета систем саморегулирования изложенным в настоящей статье способами путем сопоставления результатов, полученных из вычислений, с данными опытов.

Результаты расчета и эксперимента. Исходные данные:

1. Параметры звеньев структурной схемы: по экспериментальным данным

$$k_{ст}=3{,}6\cdot10^{-3}\ см\cdot сек^{-1}\cdot а^{-1};$$

$$k_{сн}=-1{,}75\cdot10^{-2}\ см\cdot сек^{-1}\ в^{-1};\quad k_д=22\ в\cdot см^{-1};$$

$$k_{гт}=1{,}7\cdot10^{-3}\ см\cdot а^{-1};\quad k_{гн}=-5{,}0\cdot10^{-3}\ см\cdot в^{-1};$$

$$k_{шт}=1{,}1\cdot10^{-3}\ см\cdot а^{-1};\quad k_{шн}=4{,}7\cdot10^{-2}\ см\cdot в^{-1};$$

$$T_{иг}\approx1\ сек;$$

из расчета [Л. 2] $\cos\varphi=\dfrac{U_д+U_а}{U_0}=\dfrac{33+3}{77}=0{,}47;$

$$k_{пс}=\frac{-I_д(U_д+U_а)}{U_0^2-(U_д+U_а)^2}=\frac{-800\,(33+3)}{77^2-(33+3)^2}=-6{,}1а\cdot в^{-1}.$$

2. Параметры цепей структурной схемы:

$$K_{ст}=k_д\,k_{пс}\,k_{ст}=22\,(-6{,}1)\,3{,}6\cdot10^{-3}=-0{,}482\ сек^{-1};$$

$$K_{сн}=k_д\,k_{сн}=22\,(-1{,}75\cdot10^{-2})=-0{,}385\ сек^{-1};$$

$$K_с=K_{ст}+K_{сн}=-0{,}482-0{,}385=-0{,}867\ сек^{-1};$$

$$K_{гт}=k_д\,k_{пс}\,k_{гт}=22\,(-6{,}1)\,1{,}7\cdot10^{-3}=-0{,}228;$$

$$K_{гн}=k_д\,k_{гн}=22\ (-5{,}0\cdot10^{-3})=-0{,}110;$$

$$K_г=K_{гт}+K_{гн}=-0{,}228-0{,}110=-0{,}338.$$

Статические ошибки.

1. Изменение энергетических параметров дуги: напряжение

$$\Delta u_д=\left(\frac{K_{ст}}{K_с}\right)\frac{\tilde{u}_с}{\cos\varphi}=\left(\frac{0{,}482}{0{,}867}\right)\frac{11{,}5}{0{,}47}=13{,}6\ в;$$

из осциллограммы (рис. 4)

$$\Delta u_д=14\pm1\ в;$$

ток

$$\Delta i_д=\left(\frac{K_{сн}\,k_{пс}}{K_с}\right)\left(\frac{\tilde{u}_с}{\cos\varphi}\right)=\left(\frac{0{,}385\cdot6{,}1}{0{,}867}\right)\times\left(\frac{11{,}5}{0{,}47}\right)=67\ а;$$

из осциллограммы (рис. 4)

$$\Delta i_д=60\pm10\ а.$$

2. Изменение геометрических размеров шва (в соответствии со структурной схемой рис. 2): глубина проплавления

$$\Delta h_п=h_{пт}+\Delta h_{пн}=[67\cdot1{,}7\cdot10^{-3}+13{,}6\,(-5{,}0)\cdot10^{-3}]\,10=0{,}46\ мм;$$

по макрошлифу [1]

$$\Delta h_п=0{,}4\pm0{,}1\ мм;$$

[1] Опытные данные получены путем вычисления средних значений ординат осциллографических кривых и границ проплавления на поверхности изделия или макрошлифе продольного разреза, увеличенных с помощью эпидиаскопа в 6 раз.

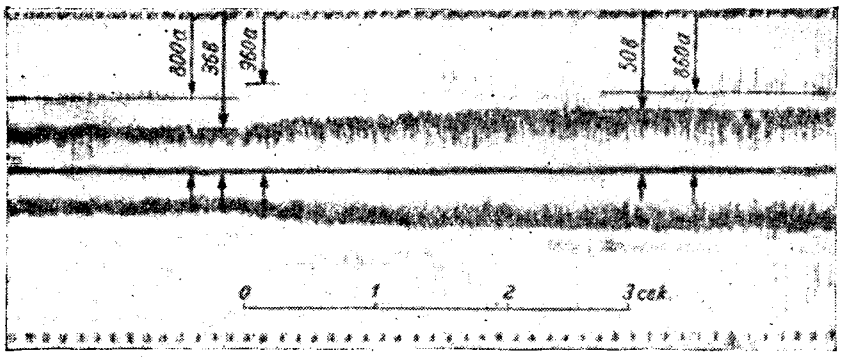


Рис. 4. Осциллограмма тока и напряжения дуги при переходном процессе.

ширина проплавления

$$\Delta b_n = \Delta b_{nm} + \Delta b_{nн} = [67 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-3} + 13{,}6 \cdot 4{,}7 \cdot 10^{-2}]\, 10 = 7{,}1 \text{ мм};$$

по наружному виду шва

$$\Delta b_n = 6 \pm 1 \text{ мм}.$$

Переходные процессы.

1. Изменение энергетических параметров дуги: по формуле (6) напряжение

$$u_д(t) = (-0{,}557 + 0{,}20e^{-0{,}51} + 0{,}36e^{-1{,}70}) \cdot \left(-\frac{11{,}5}{0{,}47}\right);$$

по формуле (8) ток

$$i_д(t) = (-2{,}71 + 1{,}21e^{-0{,}51} - 2{,}245e^{-1{,}70}) \cdot \left(-\frac{11{,}5}{0{,}47}\right).$$

Расчетные кривые $u_д(t)$ и $i_д(t)$ приводятся на рис. 5,*а*; там же для сравнения нанесены усредненные кривые, полученные осциллографическим путем.

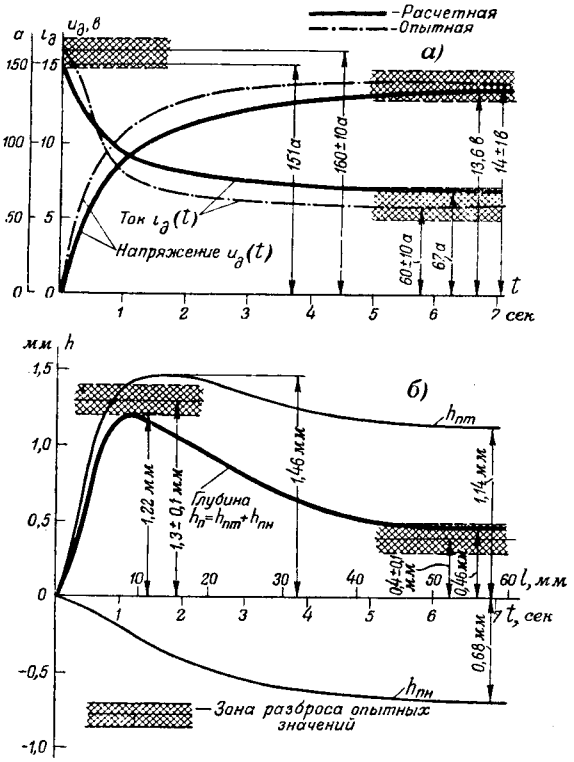


Рис. 5. Кривые переходного процесса при саморегулировании (сопоставление расчетных и опытных данных).

а — изменение тока и напряжения дуги; *б* — изменение глубины проплавления изделия.

На этом же рис. 5,*а* нанесено значение броска тока в момент приложения возмущения: по расчету эта величина равна $i_д\ (t=0) = 151\ a$; по опытным данным

$$i_д(t=0) = 160 \pm 10\ a.$$

2. Изменения глубины $h_n(t)$ и ширины $b_n(t)$ проплавления могут быть изучены точно таким же путем, как изменения энергетических параметров дуги, т. е. по передаточной функции между возмущением $\sim u_c$, с одной стороны, и величинами h_n и b_n, с другой стороны, составленной по структурной схеме (рис. 2). Не приводя выкладок, ограничимся лишь изображением кривой $h_n(t)$, рассчитанной указанным способом с некоторыми допущениями, [Л. 10], и сопоставлением этой кривой с результатами опыта (рис. 5,*б*). На рис. 5,*б* отмечены особо максимальные значения h_n: по расчету эта величина равна 1,22 *м*, по опытным данным (макрошлиф) — $1{,}3 \pm 0{,}1$ *мм*.

Практические выводы. Проведенный расчет конкретного случая автоматической сварки и ряда других аналогичных случаев показывает, что при саморегулировании: а) изменения напряжения сети дают довольно значительные ошибки по току и напряжению дуги; особенно велики относительные ошибки по напряжению; б) процесс саморегулирования при изменении напряжения сети длится 3, даже 4 *сек*, но практическое значение имеет изменение параметров в первые 1—2 *сек*; в) ошибки по ширине шва при изменении напряжения сети велики как по относительной, так и по абсолютной величине; ошибки по глубине шва очень малы, так как воздействие изменения тока на глубину шва практически компенсируется обратным воздействием на глубину изменения напряжения дуги; г) наибольшие отклонения геометрических размеров шва при изменениях напряжения сети наблюдаются через 1—2 *сек* после возмущения системы; д) отклонения результатов расчета по предлагаемой методике не расходятся с опытом больше чем на 20%.

На основании приведенных в примере расчетов можно сделать следующий практический вывод. Если режим сварки настолько стабилен, что реально возможные изменения напряжения сети не нарушают устойчивого горения дуги, то для обеспечения хорошего качества сварного соединения встык или втавр конструкций из малоуглеродистой стали нет необходимости применять в автоматах с саморегулированием специальные устройства для стабилизации изменений напряжения сети, так как основной параметр — глубина проплавления — изменяется незначительно.

В других случаях, например при сварке разнородных металлов, когда важно выдержать не только глубину, но и площадь, следовательно, и ширину шва, кроме саморегулирования целесообразно иметь быстродействующие системы регулирования напряжения дуги, воздействующие на питающую систему [Л. 2]. Совершенно очевидно, что для обеспечения хорошего качества шва быстродействие этих систем регулирования должно быть таким, чтобы переходные процессы длились не больше нескольких десятых долей секунды.

Приложение II. *Наименование, физический смысл и размерность коэффициентов и постоянных времени* (рис. 2, 3)

k_u — коэффициент интегрирования; коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц.

$k_д$ — коэффициент дуги, $всм^{-1}$; предел отношения приращения напряжения дуги $U_д$ к вызвавшему его приращению длины дуги $L_д$.

$k_{пс}$ — коэффициент питающей системы, $ав^{-1}$; предел отношения приращения тока дуги $I_д$ к вызвавшему его приращению напряжения дуги $U_д$ (см. пример в приложении I).

$k_{ст}$ — коэффициент саморегулирования по току, $см \cdot сек^{-1} \cdot а^{-1}$; предел отношения приращения скорости плавления электрода $V_{эт}$ к вызвавшему его приращению тока дуги $I_д$ при постоянном по величине напряжении дуги $U_д$.

$k_{сн}$ — коэффициент саморегулировалия по напряжению, $см \cdot сек^{-1} \cdot в^{-1}$; предел отношения приращения скорости плавления электрода $V_{эн}$ к вызвавшему его приращению напряжения дуги $U_д$ при постоянном по величине токе дуги $I_д$.

$k_{гт}$ — коэффициент глубины проплавления по току, $см \cdot а^{-1}$; предел отношения приращения глубины проплавления $H_{пт}$ к вызвавшему его приращению тока дуги $I_д$ при постоянном по величине напряжении дуги $U_д$.

$k_{гн}$ — коэффициент глубины проплавления по напряжению, $см \cdot в^{-1}$; предел отношения приращения глубины проплавления $H_{пн}$ к вызвавшему его приращению напряжения дуги $U_д$ при постоянном по величине токе дуги $I_д$.

$k_{шт}$ — коэффициент ширины проплавления по току, $см \cdot а^{-1}$; предел отношения приращения ширины проплавления $B_{пт}$ к вызвавшему его приращению тока дуги $I_д$ при постоянном по величине напряжении дуги $U_д$.

$k_{шн}$ — коэффициент ширины проплавления по напряжению, $см \cdot в^{-1}$; предел отношения приращения ширины проплавления $B_{пч}$ к вызвавшему его приращению напряжения дуги $U_д$ при постоянном по величине токе дуги $I_д$.

$k_{дг}$ — коэффициент удлинения дуги; предел отношения приращения длины дуги $L_д$ к вызвавшему его приращению глубины проплавления $H_п$.

β — коэффициент приведения; предел отношения приращения напряжения дуги $u_д$ к эквивалентному ему приращению напряжения сети $u_с$.

$T_э$ — постоянная времени нагрева электрода, *сек*; промежуток времени после ступенчатого изменения параметров дуги, в течение которого изменение скорости $v_э$ достигло бы своего установившегося значения $\Delta v_э$, если бы изменение скорости плавления происходило с максимальной начальной скоростью.

$T_{иг}$ — постоянная времени проплавления изделия по глубине, *сек*; промежуток времени после ступенчатого изменения параметров дуги, в течение которого изменение глубины проплавления $h_п$ достигло бы своего установившегося значения $\Delta h_п$, если бы изменение глубины проплавления происходило с максимальной начальной скоростью.

$T_{шн}$ — постоянная времени проплавления изделия по ширине, *сек*; промежуток времени после ступенчатого изменения параметров дуги, в течение которого изменение ширины проплавления $b_п$ достигло бы своего установившегося значения $\Delta b_п$, если бы изменение ширины проплавления происходило с максимальной начальной скоростью.

Приложение III. *Наименование, физический смысл и размерность возмущений.*

$\tilde{v}_э$, $\tilde{v}^п$, $\tilde{v}_д$ — возмущение по скорости электрода, $см \cdot сек^{-1}$; изменение скорости подачи или плавления электрода, а также изменение расстояния от изделия до электрода с некоторой скоростью.

$\tilde{l}_д$ — возмущение по длине дуги, *см*; изменение длины дуги из-за неровности профиля изделия или других механических причин.

$\tilde{u}_д$ — возмущение по напряжению дуги, *в*; изменение напряжения дуги из-за блуждания дуги или изменения градиента столба дуги.

$\tilde{u}_с$ — возмущение по напряжению сети, *в*; изменение напряжения питающей системы из-за колебания напряжения питающей сети, изменения коэффициента трансформации и других причин.

$\tilde{i}_д$ — возмущение по току дуги, *а*; изменение тока дуги из-за регулирования или изменения параметров сварочной цепи.

Литература

1. В. И. Дятлов. Новый принцип построения сварочных автоматов. Вестник машиностроения, № 9—10, 1943.

2. Г. М. Каспржак и В. М. Щитова. Структурная классификация и анализ систем автоматического регулирования процесса дуговой сварки. Известия АН СССР. ОТН, № 1, 1952.

3. Н. Н. Рыкалин. Тепловые основы сварки, часть первая. Процессы распространения тепла при дуговой сварке. Издательство АН СССР, 1947.

4. Б. Е. Патон. Выбор рационального типа сварочной головки. Труды Всесоюзной конференции по автоматической сварке под флюсом. Издательство АН УССР, 1948.

5. В. И. Дятлов. Чувствительность работы автосварочных головок с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. Труды Ленинградского политехнического института им. Калинина, № 3, 1949.

6. Г. М. Каспржак и В. М. Щитова. Некоторые приемы изучения линейных систем по структурным схемам. Сборник трудов Секции электросварки АН СССР, вып. 1. Автоматическое регулирование дуговой сварки. Издательство АН СССР, 1953.

7. А. А. Воронов. Элементы теории автоматического регулирования, Воениздат, 1950.

8. М. И. Конторович. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949.

9. Г. М. Каспржак и Л. Е Алекин. Структура и методика анализа процесса саморегулирования дуги при сварке. Сборник трудов Секции электросварки АН СССР, вып. 1, Автоматическое регулирование дуговой сварки. Издательство АН СССР, 1953.

10. Г. М. Каспржак. Методика расчета влияния ошибок регулирования на геометрические размеры сварных швов. Автоматическая сварка, № 2, 1953.

11. В. М. Щитова. Периодические колебания при сварке плавящимся электродом и их стабилизация. Автоматическая сварка. № 2, 1953.

[4. 4. 1952]

◇ ◇ ◇

Управление высоковольтными выключателями на оперативном переменном токе

Инж. Л. К. ГРЕЙНЕР и кандидат техн. наук, доц. Н. Н. НИКИФОРОВСКИЙ

Ленинград

Перевод управления высоковольтными выключателями на переменный ток имеет важное значение для удешевления электрических установок и открывает новые возможности для их автоматизации. Рассматриваются возможные пути решения задачи управления на переменном токе. Оцениваются результаты проведенных исследований и разработок и намечаются преимущественные области применения управления выключателями при помощи электромагнитного привода трехфазного тока и электромагнитных приводов постоянного тока при питании их через выпрямители различного типа. Печатается в порядке обсуждения.

Практика питания электрических приводов высоковольтных выключателей, как и других ответственных механизмов собственных нужд электроустановок, от источника постоянного тока — аккумуляторной батареи — исторически возникла в результате естественного стремления эксплуатации иметь в состоянии постоянной готовности независимый от сети высокого напряжения источник энергии для оперативных целей.

Общеизвестно, что основным электрическим приводом к высоковольтным выключателям является электромагнитный привод постоянного тока. Будучи конструктивно простым, дешевым, надежным в работе и всегда готовым к немедленному действию, он оттеснил на второй план более сложные и дорогие электродвигательные и пружинные приводы.

Однако электромагнитный привод постоянного тока, выполняя за короткое время (0,2...0,6 *сек*) значительную работу по включению выключателя, должен обладать достаточно большой мощностью. Следовательно, он является значительной, хотя и кратковременной, нагрузкой для источника постоянного тока. В настоящее время электропромышленность выпускает электромагнитные приводы постоянного тока, потребляющие от 6 до 60 *квт*.

В качестве источника постоянного тока на электростанциях и подстанциях обычно применяется аккумуляторная батарея, параметры которой во многих случаях определяются током включения одного или двух приводов одновременно. Аккумуляторная батарея оказывается большой, громоздкой и дорогой. Установка ее требует специального помещения и зарядного агрегата, а также постоянного внимания со стороны обслуживающего персонала. Нужно учесть и то обстоятельство, что для изготовления этих аккумуляторов требуется большое количество весьма ценных материалов.

Для иллюстрации можно указать, что кислотные батареи средней емкости из элементов типа С или СК № 6 и 12 содержат каждая от 3 000 до 5 000 *кг* свинца. Стоимость батареи, включая зарядный агрегат и распределительный щит, составляет внушительную сумму. Острота положения с управлением выключателями на оперативном постоянном токе с каждым годом все возрастает. Это обусловлено непрерывным ростом выпуска высоковольтных выключателей в связи с грандиозным размахом электрификации страны, а также потому, что в энергоснабжении все более широкое применение находит система глубоких высоковольтных вводов, т. е. канализация энергии на высоком напряжении до всех сколько-нибудь крупных потребителей. Система глубоких вводов дробит электрические установки, рассредоточивает их, что чрезвычайно усложняет задачу управления выключателями, ибо территориально разбросанные выключатели нуждаются и в территориально разбросанных источниках энергии для управления приводами.

Таким образом, управление выключателями на оперативном токе аккумуляторной батареи с каждым годом оказывается все более затруднительным.

Вместе с тем нельзя просто отказаться от аккумуляторной батареи и перейти, например, к ручному приводу. Такое решение вопроса даже тогда, когда оно технически выполнимо, не может рассматриваться как универсальное, так как оно противоречит общему развитию социалистической энергетики в направлении автоматизации процессов производства и распределения электрической энергии.

За последнее десятилетие получило широкое распространение автоматическое управление целыми электрическими установками — станциями и подстанциями. Все шире распространяются схемы автоматического включения резерва (АВР) и автоматического повторного включения (АПВ). Очевидно, ручной привод не может решить задачи автоматизации схем энергоснабжения и исключает дистанционное управление выключателями, не говоря о телеуправлении электрическими установками.

Из сказанного следует, что широкое развитие электрификации страны и автоматизации процессов управления с большой остротой поставило вопрос о переводе управления высоко-

вольтными выключателями с аккумуляторных батарей на другой источник энергии, свободный от указанных недостатков.

Источником энергии может быть сеть переменного тока высокого или низкого напряжения [1]. Представляется, что с технической точки зрения замена аккумуляторной батареи сетью переменного тока для наиболее распространенных установок вполне возможна. К таким распространенным установкам прежде всего можно отнести разнообразные электрические установки промышленной энергетики (электропечи, насосные, компрессорные, преобразовательные и т. д.), понизительные стационарные и временные подстанции с напряжением в 6...10...35 *кв*, насосные станции оросительных и ирригационных систем, передвижные и плавучие высоковольтные электроустановки и т. п.

При современных, все возрастающих требованиях к бесперебойности эксплуатации большинство районных, сетевых, фабрично-заводских подстанций и распределительных пунктов имеет двух- или многостороннее питание, что обеспечивает достаточную надежность управления выключателями на переменном токе, в частности, путем перекрестного питания приводов от различных вводов. Весьма облегчает задачу надежного управления выключателями на переменном токе наблюдающаяся в последнее время тенденция к отказу от установки на конечных подстанциях головного выключателя.

Менее эффективно широкое внедрение управления выключателями на переменном токе на крупных электростанциях, располагающих мощным аккумуляторным хозяйством для аварийных нужд.

Можно предполагать, что со временем область применения установок с управлением от сети переменного тока будет расширяться, в одних случаях — за счет дальнейшего вытеснения постоянного тока, в других — за счет перевода установок с ручным управлением на автоматическое дистанционное управление.

Резюмируя, можно сказать, что перевод питания силовых цепей приводов на переменный ток дает следующие преимущества:

1) создание базы для перевода электроустановок на автоматическое управление и обеспечение новых возможностей в области их автоматизации;

2) устранение громоздкого и дорогого оборудования на электроустановках — мощных аккумуляторных батарей;

3) уменьшение объема монтажных работ и уменьшение строительной кубатуры распределительных устройств за счет полного устранения или резкого сокращения аккумуляторного хозяйства;

4) значительное облегчение оборудования передвижных, подземных и всякого рода временных подстанций;

5) возможность использования освобождающихся аккумуляторных батарей и их вспомогательного оборудования, находившихся в эксплуатации, для других целей на тех установках, где они необходимы.

На заводе «Электроаппарат» по инициативе авторов статьи были проведены проектные и исследовательские работы в области питания приводов от сети переменного тока, начатые еще в 1938 г. [Л. 1, 9].

В принципе решение задачи об управлении выключателями на оперативном переменном токе возможно двумя различными путями: а) создание электромагнитных или электродвигательных приводов переменного тока, предназначенных для непосредственного питания от низковольтной сети трехфазного или однофазного тока;

б) разработка специальных полупроводниковых выпрямителей (меднозакисных или селеновых) или ионных с жидким катодом и с автоматическим зажиганием, предназначенных для питания нормальных приводов постоянного тока.

Рассмотрим сравнительные преимущества и недостатки каждого из этих двух возможных решений.

Электромагнитный привод переменного тока. Электромагнитные приводы переменного тока соленоидного типа пока не нашли применения для управления высоковольтными выключателями ни в Советском Союзе, ни в зарубежной практике.

Если обратиться к довоенной литературе, то окажется, что одни авторы [Л. 2...5] считали, что сделать соленоидный привод переменного тока достаточно компактным, простым и дешевым вообще не удастся. Другие полагали, что характеристики привода переменного тока не обеспечат нужных характеристик выключателя [Л. 4...7].

В литературе последних лет, в частности в книге «Электрическая часть станций и подстанций» [Л. 8], Ю. В. Буткевич дает значительно более оптимистичную оценку электромагнитному приводу переменного тока. Работы, проведенные на заводе «Электроаппарат» и частично опубликованные в [Л. 9], показали, что электромагнитный привод трехфазного тока удовлетворяет требованиям, предъявляемым к приводу выключателя. Характеристики включения выключателей ВМБ-10, ВГ-10, ВМГ-133, ВМ-16, ВМ-22 при включении приводом переменного тока оказались вполне приемлемыми.

Наибольший интерес в приводе переменного тока представляет магнитная система, подвижная часть которой состоит из трех пакетов Г-образной листовой стали, радиально сходящейся к штоку сердечника. Неподвижная часть магнитопровода выполнена в виде кольцеобразного ярма, намотанного из ленточной стали. Ярмо крепится на нижней плоскости основания механизма свободного расцепления привода. Под ярмом расположены три включающие катушки, в которых перемещаются сердечники подвижной части магнитопровода.

[1] Другие возможные источники энергии для питания приводов, например сжатый воздух или взрывчатые вещества, в настоящей статье не рассматриваются ввиду отсутствия достаточных данных и опыта их применения.

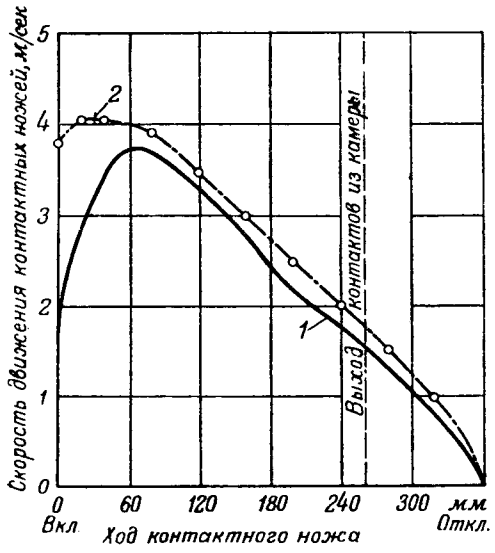


Рис. 1. Характеристика скорости включения выключателя типа ВГ-10.

1 — при включении малым приводом трехфазного тока; *2* — при включении приводом постоянного тока (типовая характеристика).

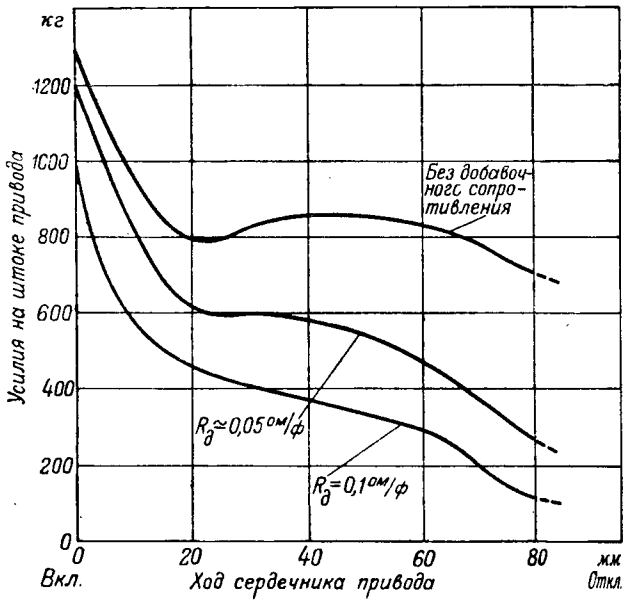


Рис. 2. Тяговые характеристики большого привода трехфазного тока при различных добавочных сопротивлениях $R_д$ в цепи привода и одном и том же числе витков обмотки.

Существенно, что тяговые характеристики разработанного привода вполне удовлетворяют обычным требованиям. Это положение иллюстрирует, например, характеристика скорости включения выключателя ВГ-10 (рис. 1), снятая при включении выключателя малым приводом переменного тока (кривая *1*, рис. 1), сконструированным на базе механизма привода ПС-10. На этом же рисунке (кривая *2*) нанесены характеристики скорости включения того же выключателя при включении его приводом постоянного тока ПС-10. Характеристики достаточно близки.

Тяговые усилия электромагнитных приводов трехфазного тока могут изменяться в широких пределах изменением числа витков в обмотке, изменением схемы соединения ее (звезда, треугольник), включением в цепь фазных обмоток привода регулируемого активного сопротивления (рис. 2).

Следует заметить, что мгновенное значение усилия на штоке сердечника есть величина постоянная, равная сумме средних усилий на каждом сердечнике привода. Эта особенность привода трехфазного тока выгодно отличает его от привода однофазного тока, у которого мгновенное значение усилия на штоке меняется с удвоенной частотой сети.

Помимо тяговых характеристик привода очень существенны его токовые характеристики. Ток в обмотке привода резко уменьшается в процессе движения сердечника (рис. 3). Ток имеет наибольшее значение при отключенном положении сердечника, наименьшее — при включенном.

Так, при включении малым приводом трехфазного тока выключателя ВМБ-10 ток в сети при отключенном положении сердечника составляет 360 *а*, при включенном положении — 120 *а*. При включении выключателя ВГ-10 ток при отключенном положении составляет 900 *а*, во включенном положении — 500 *а* (при междуфазном напряжении сети в 220 *в*).

При нормальной работе привода необходим определенный минимум напряжения на его зажимах. Расчеты показали, что для питания привода к выключателю ВМБ-10 достаточен трансформатор мощностью от 70 до 100 *ква* в зависимости от длины сечения питающего кабеля, а для питания привода к выключателям ВМГ-133 и ВГ-10 соответственно трансформатор мощностью 135...180 *ква*.

Сравнительные испытания приводов трехфазного и однофазного тока обнаружили, что токовые характеристики приводов трехфазного тока при тех же тяговых усилиях значительно лучше характеристик приводов однофазного тока.

Следует отметить, что токи включения привода переменного тока близки к пусковым токам асинхронных короткозамкнутых двигателей при прямом включении их в сеть. При этом ток включения привода трехфазного тока для ВМБ-10 равен пусковому току асинхронного двигателя мощностью 20 *квт*, а ток включения привода для ВГ-10 равен току включения асинхронного двигателя мощностью примерно 50 *квт*. Однако токи включения привода переменного тока загружают сеть на время, измеряемое десятыми долями се-

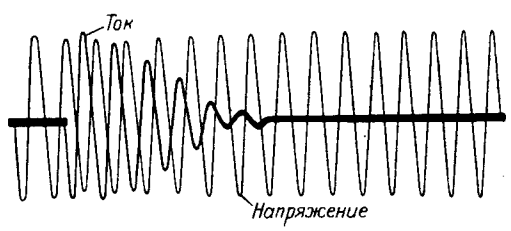


Рис. 3. Осциллограмма тока при включении высоковольтного выключателя приводом трехфазного тока.

кунды, тогда как пусковые токи асинхронных двигателей загружают сеть на время, измеряемое секундами. Это обстоятельство позволяет использовать для питания приводов трансформаторы, полностью загруженные помимо приводов обычными приемниками энергии.

Привод трехфазного тока может быть снабжен встроенным блоком защиты, состоящим из реле максимального тока и минимального напряжения.

Резюмируя, можно отметить, что перед всеми другими возможными решениями электромагнитный привод трефазного тока имеет существенные технико-экономические преимущества:

1) простота конструкции и изготовления (механизм используется от соответствующего привода постоянного тока);

2) относительная дешевизна — вместе с блоком защиты стоимость привода составит примерно 200% к стоимости привода постоянного тока;

3) небольшие габариты;

4) простота управления;

5) малое собственное время;

6) возможность простого регулирования тяговой характеристики в широких пределах.

Полупроводниковые выпрямители. Особые преимущества для решения задачи питания приводов к высоковольтным выключателям представляют полупроводниковые выпрямители — меднозакисные и селеновые.

По сравнению с другими видами выпрямителей меднозакисные и селеновые выпрямители имеют следующие преимущества:

1) большой срок службы;

2) отсутствие подвижных и изнашивающихся частей;

3) отсутствие потребности в непрерывном уходе;

4) высокая механическая прочность;

5) в пределах, потребных для приводов мощностей, возможность комплектования выпрямительных агрегатов на любые параметры по току и напряжению путем последовательно-параллельного соединения требуемого числа элементов.

При питании полупроводниковым выпрямителем электромагнитного привода постоянного тока выпрямители работают в режиме кратковременной нагрузки, при этом: 1) допускаемая плотность тока на отдельный элемент может быть значительно повышена, без опасения перегрева выпрямителя; 2) допускаемая величина обратного напряжения на отдельный элемент также может быть повышена, так как отпадает опасность теплового пробоя; 3) при кратковременном режиме работы выпрямителя можно не принимать во внимание к. п. д. установки в качестве экономического показателя.

Теоретические и экспериментальные исследования вопросов работы полупроводниковых выпрямителей в режиме питания привода позволили рассчитать полупроводниковые меднозакисные и селеновые выпрямители, содержащие минимальное число выпрямительных элементов стандартного исполнения [Л. 10, 11].

Рассчитанные выпрямители собираются по трехфазной мостовой схеме (рис. 4), как оптимальной. Например, селеновый выпрямитель мощностью 6 *квт* был собран всего из 60 выпрямительных элементов диаметром 100 *мм*. Выпрямитель был предусмотрен для непосредственного присоединения к сети переменого тока с междуфазным напряжением 220 *в* (без трансформатора) и для питания нормального электромагнитного привода на 220 *в*.

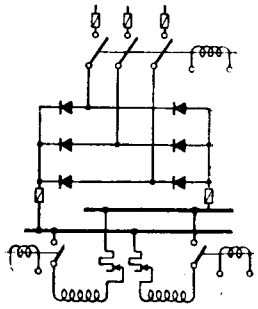


Рис. 4. Принципиальная схема полупроводникового выпрямителя, питающего группу приводов.

На рис. 5 приведены характеристики включения выключателя с электромагнитным гашением дуги типа ВЭМ-10 при питании привода к нему через селеновый выпрямитель мощностью 6 *квт*.

В нормальных условиях работы один выпрямитель может обслуживать группу выключателей с общим количеством операций включения до 40 за каждые 30 *мин* при любых интервалах между операциями.

Заметная зависимость выпрямленного напряжения полупроводникового выпрямителя от тока нагрузки (рис. 6) допускает одновременное включение лишь одного выключателя. Для одновременного включения двух выключателей необходима установка выпрямителя соответственно большой мощности. Для удовлетворительной работы привода при одиночном включении должна быть предусмотрена специальная схема коммутации.

В режиме питания приводов к выключателям выпрямители могут работать в диапазоне темпе-

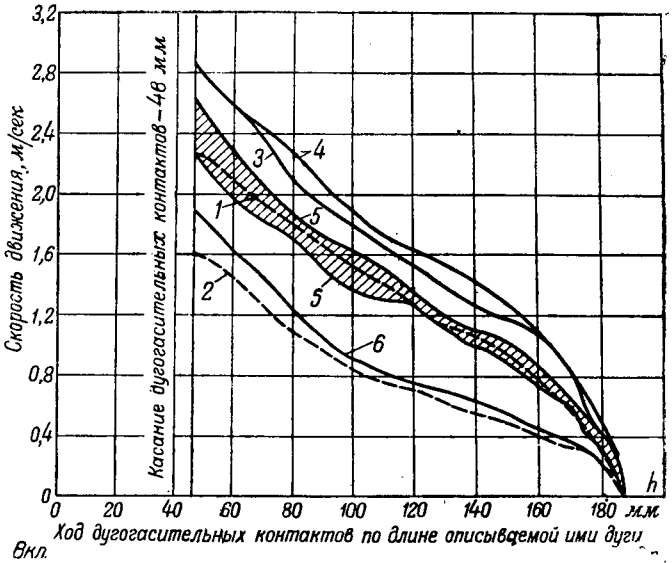


Рис. 5. Характеристики скорости включения выключателя типа ВЭМ-10 (с электромагнитным гашением дуги) при питании привода через полупроводниковый выпрямитель.

1 — питание привода от мощного двигатель-генератора и номинальном напряжении на приводе $U_{пр} = 220$ *в*; *2* — то же при пониженном напряжении на приводе $U = 176$ *в*; *3* — питание привода через селеновый выпрямитель и номинальном напряжении сети $U = 220$ *в*, $t_{выпр} = +35°$ С; *4* — то же при напряжении сети $U_c = 231$ *в* и $t_{выпр} = 35°$ С; *5* — то же при $U_0 = 220$ *в* и различной температуре выпрямителя ($t_{выпр} = +17°$ С . . . 27° С); *6* — то же при $U_c = 198$ *в* и $t_{выпр} = 27°$ С.

Рис. 6. Осциллограмма выпрямленного напряжения и тока в приводе при включении меднозакисным выпрямителем выключателя типа ВМ-16/1250 с приводом ПС-10.

ратур от —40° С до +35° С, меднозакисные выпрямители при отрицательных температурах нуждаются в обогревании.

Ионные выпрямители с жидким катодом. Точка зрения о пригодности выпрямителей типа игнитрон для питания приводов к высоковольтным выключателям была высказана и подтверждена еще в предыдущей работе [Л. 9].

Как известно, положительными свойствами стеклянных ртутных выпрямителей являются: легкий контроль и наглядность рабочего процесса, постоянство вакуума, отсутствие вспомогательных устройств (за исключением цепи зажигания) и постоянство внутреннего падения напряжения. Специфические преимущества выпрямительных схем с игнитронами следующие: 1) возможность управления большими мощностями посредством коммутации во вспомогательной цепи; 2) высокая перегрузочная способность; 3) возможность регулирования процессов зажигания; 4) отсутствие надобности в уходе; 5) стандартное исполнение и взаимозаменяемость.

Как и в случае полупроводниковых выпрямителей, предпочтение было отдано трехфазным схемам включения по причинам: 1) возможности питания приводов с нормальными обмотками и без промежуточной трансформации; 2) расширение диапазона нагрузок (в частности, возможность одновременного включения нескольких приводов); 3) относительно меньшая токовая загрузка отдельных колб, что расширяет возможности нагрузочного режима (увеличение числа следующих друг за другом операций).

Дальнейшие изыскания выявили возможность расширения области применения ионных выпрямителей до обслуживания приводов большой мощности при одновременном включении двух или нескольких единиц. Для этих целей, по данным эксперимента, вполне пригоден ионный выпрямитель, собранный в трехфазную мостовую схему.

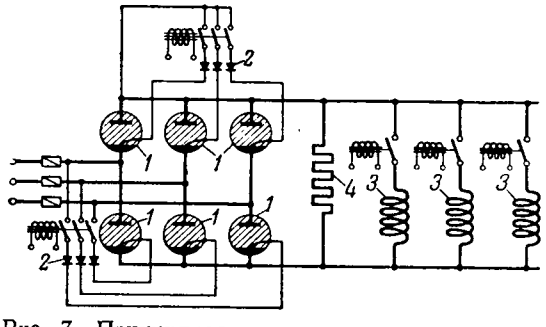


Рис. 7. Принципиальная схема ионного выпрямителя, питающего группу приводов.

1 — игнитроны; *2* — полупроводниковые выпрямители в цепи зажигания; *3* — обмотки приводов к выключателям; *4* — шунтирующее сопротивление.

На рис. 7 изображена принципиальная схема соединений рассматриваемого выпрямителя. Помимо игнитронов схема содержит вентили в цепи зажигания (например, меднозакисные), нагрузку в виде обмоток приводов, активное шунтирующее сопротивление и контакторы. Активное сопротивление оказалось необходимым включить в схему в связи с тем, что при работе игнитронов на высокоиндуктивную нагрузку (обмотки приводов к выключателям) немедленное возбуждение рабочей дуги с включением цепи зажигателей оказывается затрудненным, так как необходимо некоторое время для нарастания тока в зажигателях до величины, минимально необходимой для ионизации. Введение в схему сопротивления позволяет

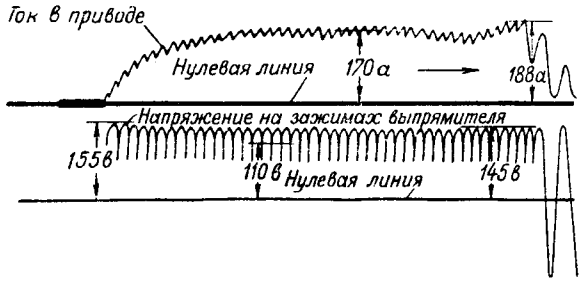


Рис. 8. Осциллограмма выпрямленного напряжения и тока в приводе ПС-20 к выключателю типа ВМ-23/1500 при питании привода ионным выпрямителем, собранным в трехфазную схему с нулевым выводом.

одновременно с включением цепи зажигателей получить в них ток, достаточный для возбуждения рабочей дуги.

Таким образом, введение сопротивления сокращает оперативное время включения выключателя. Включение сопротивления позволяет активно воздействовать и на ускорение процесса затухания тока в цепи привода, поддерживаемого после размыкания цепи зажигателей энергией магнитного поля привода.

На осциллограмме (рис. 8) приведена запись выпрямленного напряжения и тока в приводе, регистрирующая также пульсацию тока в обмотке электромагнитного привода после размыкания цепи зажигателей.

Характеристики выключателей при питании приводов к ним от ионного выпрямителя удовлетворяют обычным требованиям, что следует, в частности, из рассмотрения скорости включения выключателя типа МКП-16ОД (рис. 9) при питании привода к нему (мощностью в 55 *квт*) рассматриваемым ионным выпрямительным агрегатом.

Как показали исследования, ионный выпрямитель, собранный в трехфазную мостовую схему, при междуфазном напряжении 220 *в* без специальной трансформации напряжения и при нормальных обмотках приводов, может обслуживать нагрузку мощностью до 60...70 *квт*, допуская в пределах приводимой величины одновременное

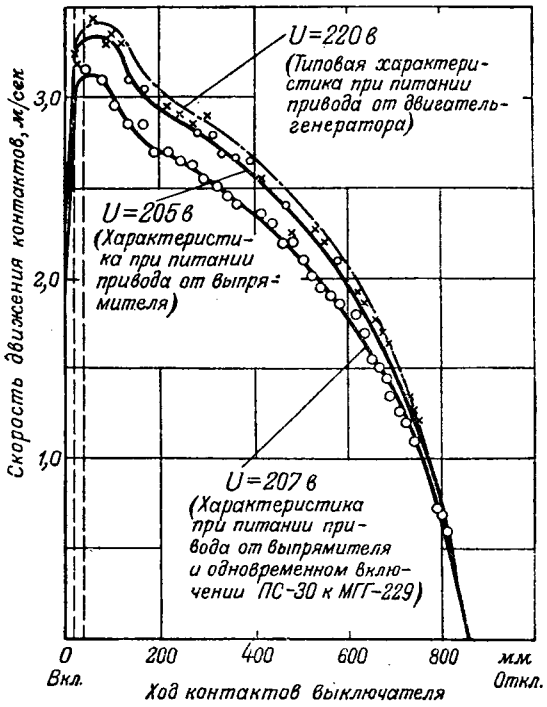


Рис. 9. Характеристики скорости включения выключателя типа МКП-160 с приводом ПС-30 при питании привода через ионный выпрямитель, собранный в трехфазную мостовую схему.

включение группы приводов. Диапазон возможных температур окружающей среды проверен экспериментально в пределах от 0 до +35° С.

При заметно меньшей мощности вероятных нагрузок или при междуфазном напряжении 380 *в* целесообразно воспользоваться более компактным трехфазным выпрямителем с нулевым выводом, также применимым без предварительной специальной трансформации напряжения для питания приводов с нормальными обмотками.

Однофазные схемы включения игнитронов требуют введения специальной трансформации напряжения или применения специальных обмоток приводов на более низкие напряжения. Внешняя характеристика однофазных выпрямителей менее благоприятна, чем у трехфазных, а загрузка колб относительно больше. Таким образом, применение однофазных схем для питания приводов менее целесообразно.

К числу недостатков игнитронов следует отнести меньший срок службы, чем у полупроводникового выпрямителя, и относительно бо́льшие размеры выпрямительного агрегата.

Сравнение различных методов управления на переменном токе. Из приведенного краткого обзора различных методов питания приводов на переменном токе можно видеть, что преимущества и недостатки отдельных вариантов требуют дифференцированного подхода к выбору оптимального решения в зависимости от перечисленных ниже факторов: 1) мощность обслуживаемого привода (приводов); 2) потребное число одновременно включаемых объектов (один или несколько); 3) род установки привода (выпрямителя) — внутренняя или наружная; 4) мощность питающего трансформатора и сечение кабельной сети (для действующих установок); 5) требуемый срок службы; 6) предельные габариты и вес; 7) механическая прочность (тряскоустойчивость и пр.); 8) стоимость.

Принципиально при небольшой мощности наиболее пригодным является электромагнитный привод.

При вероятном одновременном включении переменного числа приводов одинаковой или различной мощности следует, вообще говоря, предпочитать ртутные выпрямители с автоматическим зажиганием. Наименьшая мощность трансформатора и минимальное сечение трехфазного кабеля требуются в случае применения трехфазного игнитронного выпрямителя.

В отношении же срока службы — преимущество на стороне полупроводниковых выпрямителей.

Таковы вкратце общие технические соображения по выбору системы привода переменного тока.

Необходимо особо остановиться и на экономических критериях выбора, которые при прочих равных условиях могут в некоторых случаях оказаться решающими.

Как известно, стоимость полупроводникового выпрямителя возрастает пропорционально выпрямленной мощности. Для игнитронов и электромагнитных приводов эта зависимость имеет нелинейный характер и выражается кривой, медленно возрастающей с увеличением мощности. При применении выпрямителей большое значение имеет число приводов, обслуживаемых одной выпрямительной установкой. Исследованные образцы полупроводниковых и ртутных выпрямителей в реальных условиях эксплуатации могут обеспечить питание до 40...50 приводов, т. е. практически достаточно иметь один комплектный выпрямитель на крупную электроустановку.

Ввиду того, что стоимость специальных выпрямителей различных типов, предназначенных для питания приводов, еще окончательно не определилась, сопоставление их экономических показателей следует делать осторожно. Если за единицу сравнения принять стоимость привода средней мощности с индивидуальным источником питания, то без учета вспомогательной аппаратуры соотношение стоимости установки при различных условиях питания может быть выражено приближенными цифрами, приведенными в таблице (электромагнитный привод переменного тока принят за 100%).

На рис. 10 сделана попытка наметить оптимальные области применения приводов, работающих на переменном токе, с учетом изложенных технико-экономических соображений.

Разумеется, по мере развития методов управления выключателями на переменном токе и накопления соответствующего проектного, производственного и эксплуатационного опыта представляется возможным в будущем уточнить тех-

Привод постоянного тока с кислотной аккумуляторной батареей	Привод постоянного тока с трехфазным полупроводниковым выпрямителем	Привод постоянного тока с трехфазным игнитронным выпрямителем	Электромагнитный привод переменного тока
Батарея 2 000 . . . 2 450% Привод 50	Выпрямитель 150 . . . 200 Привод 50	Выпрямитель 150 Привод 50	— Привод 100
До 2 500%	До 250%	200 %	100 %

Примечание. При отнесении стоимости выпрямителя на группу одновременно обслуживаемых приводов соотношение ценностных показателей резко изменится и может приблизиться к единице (и даже меньше) по отношению к электромагнитным приводам переменного тока.

нико-экономические достоинства различных вариантов решения.

Авторы статьи считают своим долгом отметить непосредственное многолетнее участие в работах по управлению выключателями на переменном токе инженеров завода «Электроаппарат» С. Н. Захарова и С. А. Чирцова.

Большую поддержку в проведении настоящей работы оказали доктор техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич и доктор техн. наук, проф. И. А. Сыромятников.

Литература

1. Л. К. Грейнер. Пути развития приводов к высоковольтным выключателям на заводе „Электроаппарат" в III пятилетии. Труды Первого всесоюзного совещания по высоковольтной аппаратуре, ОНТИ, 1938.

2. Ю. В. Буткевич и А. М. Мелькумов. Аппаратура распределительных устройств высокого напряжения, ОНТИ, 1936.

3. А. Я. Буйлов. Выключатели переменного тока высокого напряжения, М.—Л., ОНТИ, 1936.

4. Аппаратура распределительных устройств высокого напряжения. Под ред. И. С. Ароновича, М.—Л., ОНТИ, 1938.

5. A. — C. Solenoids for C. — B. Closing. Electrical Times, P. 620, Dec. 1939.

6. W. Herzog. Einschaltproblem des ferngesteuerten Hochspannungschalters. Сборник „Hochspannungsforschung und Hochspannungspraxis", 1931.

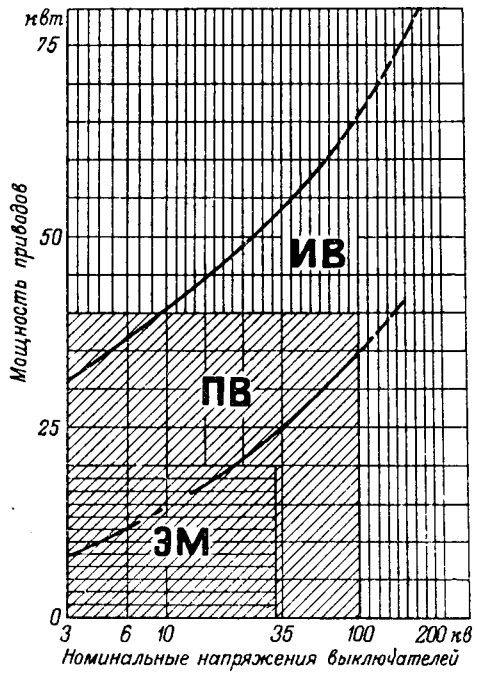


Рис. 10. Область возможного применения приводов переменного тока различного типа для выключателей на напряжения до 220 *кв*. Область фактического применения приводов лежит между верхней и нижней граничными кривыми.

ЭМ — привод переменного тока; *ПВ* — привод постоянного тока с полупроводниковым выпрямителем; *ИВ* — то же с ионным выпрямителем.

7. W. Brainard. Power for Circuit Breaker Solenoids. The Electric Journal, p. 189, Mai 1933.

8. Электрическая часть станций и подстанций под ред. А. А. Глазунова, Госэнергоиздат, 1951.

9. Н. Н. Никифоровский. О питании приводов высоковольтных выключателей от сети переменного тока. Электрические станции, № 9, 1940.

10. Н. Н. Никифоровский. О расчете и работе твердого выпрямителя в режиме кратковременной перегрузки. ЖТФ, т. X, вып. 22, 1940.

11. Н. Н. Никифоровский. О расчете полупроводниковых выпрямителей для режима кратковременных нагрузок. Труды ЛПИ, № 3, 1950.

[25. 11. 1952]

◇ ◇ ◇

Стабилизация выходного напряжения ионного преобразователя частоты

Кандидат техн. наук **Г. И. ШЕВЧЕНКО**

Московский энергетический институт им. Молотова

Предлагается метод стабилизации выходного напряжения параллельного инвертора путем подмагничивания инверторного трансформатора. Приводится простое выражение для определения выходного напряжения. Предлагается схема преобразователя частоты на девяти вентилях, обладающего способностью к самоликвидации срывов инвертирования.

В ряде отраслей промышленности — машиностроительной, текстильной, деревообрабатывающей и др. — внедряется высокоскоростной электропривод. Для вращения асинхронных двигателей высокоскоростных электроприводов необходим трехфазный ток повышенной частоты — порядка 500 . . . 1 000 *гц* и более. Однофазный ток повышенной частоты также используется для индукционного нагрева.

Наиболее экономичным способом получения тока повышенной частоты для указанных целей является преобразование тока промышленной частоты в ток повышенной частоты при помощи ионных преобразователей.

Как известно, ионные преобразователи частоты строятся по следующему принципу: выпрямление тока промышленной частоты и последующее инвертирование постоянного тока в ток повышенной частоты. В качестве инверторного звена чаще всего используется так называемый „параллельный" или автономный инвертор (рис. 1), в котором коммутация тока с одного прибора на другой осуществляется при помощи конденсаторов, присоединенных параллельно обмоткам трансформатора [Л. 2].

Преобразователю частоты, у которого выходным звеном является параллельный инвертор (шести-, трех- или двухфазный), присущ большой недостаток, свойственный параллельному инвертору, а именно: крутопадающая нагрузочная характеристика (ниже — кривая *3*, рис. 5). Напряжение на выходе у такого преобразователя изменяется в несколько раз при изменении тока нагрузки от нуля до номинальной величины при постоянной частоте управления и постоянном напряжении на входе.

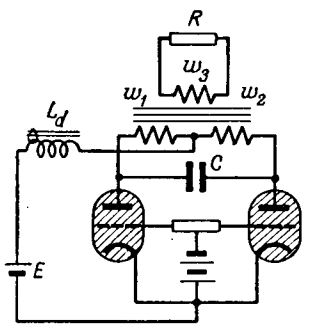


Рис. 1. Двухфазный параллельный инвертор.

Некоторое улучшение нагрузочной характеристики дает присоединение параллельно нагрузке большого дросселя [Л. 8]. Однако и при наличии дросселя при изменении тока нагрузки от нуля до номинального напряжение выхода изменяется на 20 . . . 30%. Кроме того, добавление специального дросселя удорожает установку.

Достаточно удовлетворительная стабилизация выходного напряжения параллельного инвертора получена путем применения в схеме инверторного трансформатора с подмагничиванием [Л. 7, 9]. Трансформатор с подмагничиванием одновременно выполняет роль регулируемой индуктивности, присоединенной параллельно нагрузке. Подмагничивание трансформатора током, пропорциональным току нагрузки, позволяет осуществить автоматическую стабилизацию выходного напряжения по нагрузке.

Выходное напряжение параллельного инвертора. Для упрощения расчетов будем считать, что коммутация тока с вентиля на вентиль в параллельном инверторе (рис. 1) происходит мгновенно. Пренебрегаем потоками рассеяния и учитываем только главный поток, которому соответствует индуктивность L_0 ветви намагничивания трансформатора. Эта индуктивность является параметром цепи, путем изменения которого достигается стабилизация выходного напряжения инвертора. Изменение L_0 производится сравнительно медленно, и при расчете будем считать ее постоянной и в первом приближении линейной [Л. 4]. В расчете применен операторный метод, позволяющий упростить анализ и получить решение как для установившегося, так и для переходного режимов.

При зажигании левого вентиля (рис. 1), что эквивалентно включению рубильника A (рис. 2), изображением тока в нагрузочном сопротивлении будет:

$$I'(p) = \frac{E}{Z(p)}, \qquad (1)$$

где $Z(p)$ — в операторной форме полное сопротивление цепи, изображенной на рис. 2, *а*.

При включении только правого вентиля (рубильника B, рис. 2, *б*) изображение тока в нагрузочном сопротивлении

$$I''(p) = -\frac{E}{Z(p)}. \qquad (2)$$

Вследствие симметрии схемы инвертора переход от схемы рис. 2, *а* к схеме рис. 2, *б* ведет

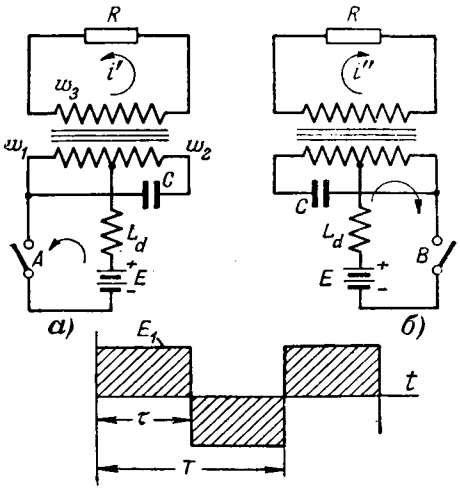


Рис. 2. Эквивалентные схемы параллельного инвертора.
а — для включения левого рубильника; *б* — для включения правого рубильника.

только к изменению направления тока в нагрузочном сопротивлении или, что то же самое, к перемене знака у э. д. с. E при одной и той же схеме, например с замкнутым рубильником A. Перемена знака у э. д. с. происходит через промежуток времени $\tau=\frac{T}{2}$, равный половине периода изменения управляющего напряжения.

Изображением знакопеременной э. д. с. E_1 с импульсами прямоугольной формы является ряд [Л. 5]:

$$E(p)=E(1-2e^{-\tau p}+2e^{-2\tau p}+\ldots)=$$
$$=E\,\mathrm{th}\frac{\tau p}{2}. \qquad (3)$$

Поэтому изображением тока в нагрузке будет:

$$I(p)=\frac{E(p)}{Z(p)}, \qquad (4)$$

и эквивалентная схема для переменных составляющих токов и напряжений примет вид рис. 3.

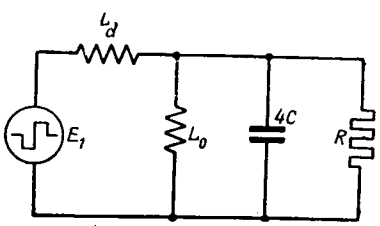


Рис. 3. Эквивалентная схема для переменных составляющих токов и напряжений двухфазного параллельного инвертора.

В этой схеме коммутирующее устройство (вентили — конденсатор) представлено генератором знакопеременной э. д. с. E_1 с импульсами прямоугольной формы. Трансформатор представлен только индуктивностью ветви намагничивания L_0. Емкость конденсатора приведена к числу витков одной из половин первичной обмотки.

По эквивалентной схеме найдено полное сопротивление в операторной форме:

$$Z(p)=2L_dC(p^2+2ap+b), \qquad (5)$$

где

$$a=\frac{1}{2RC},\quad b=\frac{L_d+L_0}{4L_dL_0C}.$$

По изображению тока (4) можно найти оригинал [Л. 5] напряжения на выходе как сумму установившегося значения напряжения и свободной составляющей:

$$u(t)=i(t)R=u'(t)+u''(t). \qquad (6)$$

Установившееся значение напряжения на выходе

$$u'(t)=\frac{2E}{\pi L_dC}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin\left[\frac{\pi}{\tau}(2n-1)t-\psi_n\right]}{(2n-1)\sqrt{\left\{\left(b-\frac{\pi^2}{\tau^2}(2n-1)^2\right\}^2+\left\{2a\frac{\pi}{\tau}(2n-1)\right\}^2}}, \qquad (7)$$

где $n=1, 2, 3, \ldots,$

$$\mathrm{tg}\,\psi_n=\frac{2a\frac{\pi}{\tau}(2n-1)}{b-\left\{\frac{\pi}{\tau}(2n-1)\right\}^2}.$$

После суммирования тригонометрического ряда можно получить выражение для мгновенных значений выходного напряжения, аналогичное приведенному в [Л. 5] или в [Л. 6].

Свободная составляющая напряжения на выходе в случае $a^2<b$

$$u''(t)=\frac{Ee^{-at}}{2L_dC\omega\sqrt{b}}\sqrt{\frac{\mathrm{ch}\,a\tau-\cos\omega\tau}{\mathrm{ch}\,a\tau+\cos\omega\tau}}\sin(\omega t+\varphi-\lambda); \qquad (8)$$

$$\mathrm{tg}\,\lambda=\frac{\mathrm{sh}\,\omega\tau}{\mathrm{sh}\,a\tau};\quad \mathrm{tg}\,\varphi=\frac{\omega}{a};\quad \omega=\sqrt{b-a^2}. \qquad (9)$$

Если $a^2>b$, то выражение для свободной составляющей может быть получено из (8) и (9) путем замены

$$\Omega=j\omega,\quad \psi=j\varphi,\quad \chi=j\lambda.$$

В литературе приведены весьма громоздкие и неудобные для практического использования выражения для выходного напряжения двухфазного [Л. 8] и трехфазного [Л. 3] инверторов. Выражение в виде тригонометрического ряда (7) позволяет найти более простое приближенное выражение для выходного напряжения.

При двух- и трехфазном инверторе, в котором применен трансформатор с подмагничиванием, нормальным является режим, когда выходное напряжение близко к синусоидальному. Поэтому в ряде (7) можно отбросить все члены, кроме первого, полагая при этом, что выходное напряжение определяется главным образом основной гармонической.

Согласно (7) при $n=1$

$$u'(t)=\frac{2E}{\pi L_dC}\frac{\sin\left(\frac{\pi}{\tau}t-\psi\right)}{\sqrt{\left(b-\frac{\pi^2}{\tau^2}\right)^2+\left(\frac{2a\pi}{\tau}\right)^2}}, \qquad (10)$$

где

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{2a\frac{\pi}{\tau}}{b - \frac{\pi^2}{\tau^2}}.$$

Из выражения (10) следует, что при изменении нагрузки R изменяется величина выходного напряжения инвертора. Поддерживать выходное напряжение на неизменном уровне можно было бы путем изменения емкости конденсатора C или напряжения источника постоянного тока E. Однако изменение емкости трудно автоматизировать, а изменение E необходимо производить в очень широких пределах. Глубокая регулировка напряжения источника постоянного тока путем изменения угла зажигания выпрямительного звена преобразователя частоты требует большого дросселя для сглаживания пульсаций и ведет к значительному усложнению схемы сеточного управления.

Поэтому более удобным и легко поддающимся автоматизации является стабилизация выходного напряжения путем изменения индуктивности ветви намагничивания трансформатора при подмагничивании. При этом, чем меньше ток нагрузки, тем меньше должна быть индуктивность, т. е. тем больше должен быть ток подмагничивания инверторного трансформатора.

Инвертор с автоматической стабилизацией выходного напряжения. На рис. 4 приведена схема двухфазного параллельного инвертора с автоматической стабилизацией выходного напряжения.

Инверторный трансформатор с подмагничиванием выполнен подобно обычному дросселю насыщения.

Первичная w_1, w_1', w_2, w_2' и вторичная w_3, w_3' обмотки трансформатора расположены на магнитных системах так же, как обмотки переменного тока обычного дросселя насыщения. Обмотки подмагничивания трансформатора w_4, w_4' располагаются аналогично обмоткам постоянного тока дросселя насыщения. Изменение тока подмагничивания в обмотках w_4, w_4' производится автоматически в функции тока нагрузки посредством устройства, состоящего из измерительного трансформатора тока TT, вентильного моста $ВМ_1$ и магнитного усилителя $ДН$ и $ВМ_2$.

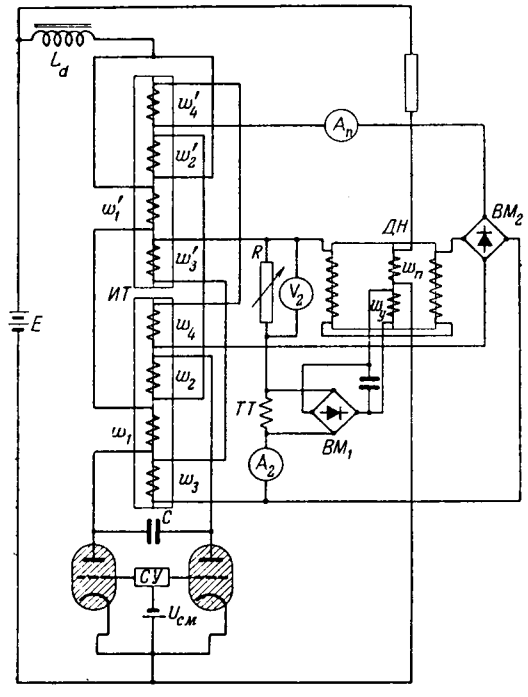


Рис. 4. Схема параллельного инвертора с автоматической стабилизацией выходного напряжения.

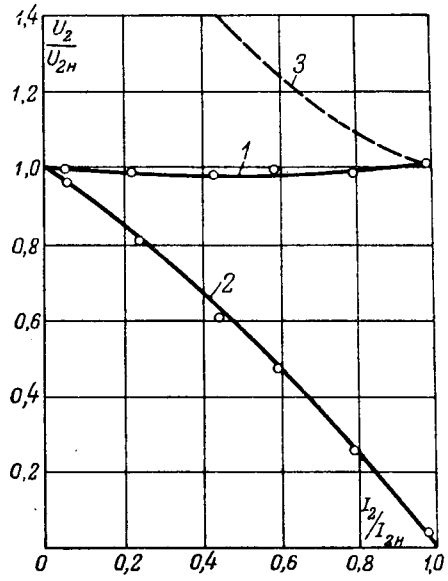


Рис. 5. Характеристики параллельного инвертора с автоматической стабилизацией выходного напряжения.

1 — внешняя характеристика; *2* — изменение тока подмагничивания при стабилизации; *3* — примерный ход внешней характеристики параллельного инвертора без стабилизации.

Путем соответствующего подбора параметров системы регулирования и инвертора можно получить постоянное или даже возрастающее с увеличением тока напряжение на выходе.

На рис. 5 приведена внешняя характеристика *1* параллельного инвертора с автоматической стабилизацией выходного напряжения. Пунктиром для

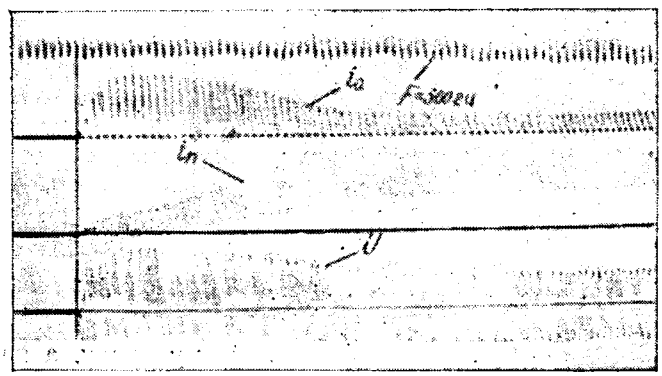


Рис. 6. Осциллограммы переходного процесса при включении параллельного инвертора с небольшой нагрузкой.

i_a — ток через вентиль; i_n — ток подмагничивания инверторного трансформатора; u — напряжение на выходе.

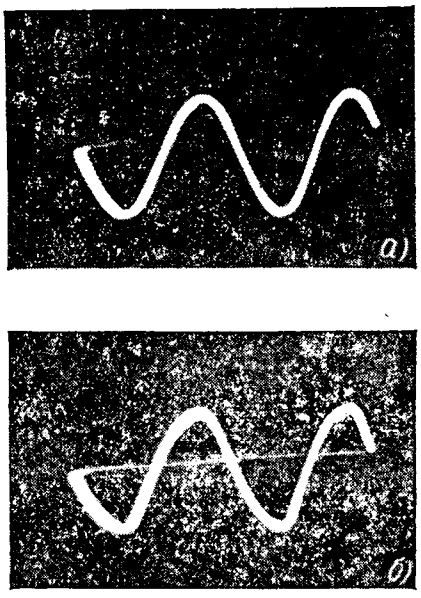


Рис. 7. Осциллограммы выходного напряжения параллельного инвертора.
а — в режиме, близком к холостому ходу; *б* — в режиме, близком к короткому замыканию.

сравнения дана внешняя характеристика параллельного инвертора без стабилизации (*3*). На рис. 6 приведены осциллограммы переходных процессов в параллельном инверторе с автоматической стабилизацией выходного напряжения. При включении инвертора с малой нагрузкой напряжение на выходе U возрастает до больших значений с постоянной времени, определяемой из (8). В начале процесса ток подмагничивания $i_п$ еще мал и не оказывает существенного влияния на величину индуктивности L_0. По мере роста тока подмагничивания индуктивность L_0 уменьшается, что ведет в соответствии с (10) к уменьшению напряжения на выходе до установленной величины. На рис. 6 приведены осциллограммы для наиболее неблагоприятного случая включения стабилизированного инвертора с небольшой нагрузкой. Как видно из осциллограмм, в переходном режиме напряжение на выходе и ток через вентиль превышают установившиеся значения. При включении нагруженного инвертора превышение напряжения в переходном режиме над установившимся незначительно. Аналогичным образом восстанавливается заданное напряжение при внезапных изменениях нагрузки.

Длительность переходных процессов зависит от выбора параметров системы автоматического регулирования.

На рис. 7 приведены осциллограммы выходного напряжения для двух режимов. На рис. 7,*а* для режима, близкого к холостому ходу, а на рис. 7,*б* — для режима, близкого к короткому замыканию. Следует отметить, что подмагничивание инверторного трансформатора улучшает также и форму выходного напряжения.

Выражение (10) позволяет рассчитать характеристику изменения индуктивности, а затем, пользуясь каким-либо из известных методов расчета, для заданной конструкции инверторного трансформатора найти необходимую зависимость тока подмагничивания от тока нагрузки, обеспечивающую стабилизацию выходного напряжения.

Подробный расчет характеристик показал удовлетворительное совпадение их с экспериментальными [Л. 8].

Трехфазный ионный преобразователь частоты с минимальным числом вентилей. Существует несколько модификаций схем преобразователей частоты с использованием параллельного инвертора. В хорошо известной схеме преобразователя частоты Д. А. Завалишина [Л. 1] применено выпрямление по трехфазной схеме с выводом нулевой точки трансформатора и инвертирование по схеме двойная звезда с уравнительным реактором. Обладая способностью к самоликвидации ненормальных режимов, схема Д. А. Завалишина имеет и крупный недостаток, а именно в схеме большое число вентилей —18.

В предложенной автором [Л. 7] схеме ионного преобразователя частоты (рис. 8) сохранена способность преобразователя к самоликвидации срывов инвертирования, но число вентилей уменьшено до девяти.

В этой схеме каждая из трех групп вентилей: $A_1A_2A_3$; $B_1B_2B_3$; $C_1C_2C_3$, связана с соответствующей обмоткой выпрямительного трансформатора BT, представляя собой как бы один вентиль, участвующий в процессе выпрямления по трехфазной схеме с выводом нулевой точки выпрямительного трансформатора (по однотактной схеме). Каждая из трех групп вентилей *I*, *II*, *III* участвует в инвертировании тока по трехфазной схеме с выводом нулевой точки инверторного

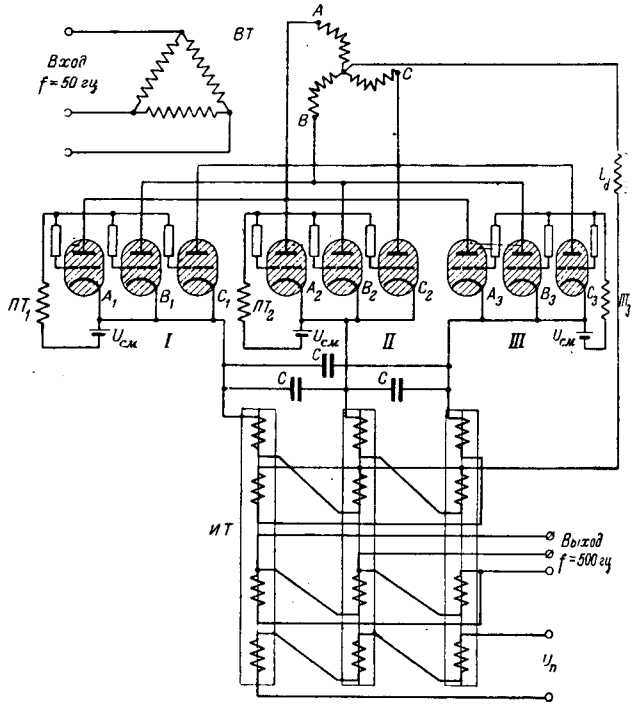


Рис. 8. Схема трехфазного преобразователя частоты с минимальным числом вентилей и автоматической стабилизацией выходного напряжения.

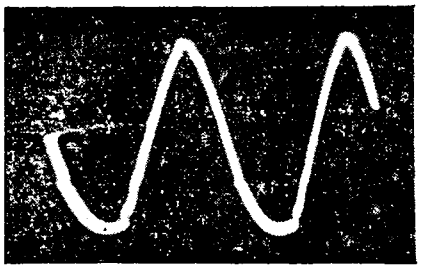


Рис. 9. Осциллограмма напряжения на выходе преобразователя частоты с минимальным числом вентилей.

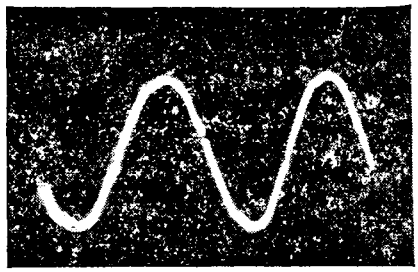


Рис. 10. Осциллограмма выходного напряжения при шестифазном инвертировании и трехфазном выходе.

трансформатора (также по однотактной схеме) с частотой, которая задается на сетки вентилей посредством пик-трансформаторов *ПТ*. Коммутация тока с вентиля на вентиль между группами *I, II, III* осуществляется при помощи конденсаторов *C*, как в обычном параллельном инверторе. Для лучшего использования вентилей частота на выходе преобразователя должна быть выше частоты сети. В том случае, если частота на выходе близка или кратна частоте питающей сети, смена вентилей между группами *I, II, III* происходит нерегулярно, что ведет к перегрузке приборов.

В этой схеме срывы работы инвертора за счет кратковременных перегрузок или случайных пропусков зажигания не являются аварийными. Ненормальный режим одновременного горения пары приборов вместо поочередного может продолжаться только в течение одной трети периода изменения напряжения питающей сети, т. е. до тех пор, пока не произойдет смена в работе и погасание группы приборов, связанных с одной из фаз выпрямительного трансформатора.

В предложенной схеме преобразователя частоты применен также инверторный трансформатор с подмагничиванием с целью стабилизации выходного напряжения. Управление током подмагничивания производится автоматически по схеме, аналогичной той, которая приведена на рис. 4. Характеристики описанного преобразователя частоты подобны приведенным на рис. 5 характеристикам параллельного инвертора. При инвертировании по схеме: «трехфазная звезда с выводом нулевой точки», с обычным трансформатором без подмагничивания напряжения на выходе сильно искажено за счет большого содержания четных гармонических. Подмагничивание инверторного трансформатора позволяет снизить содержание высших гармоник в выходном напряжении до 6...8% (рис. 9).

Необходимо отметить, что задача одновременного улучшения формы кривой выходного напряжения и его величины не может быть удовлетворительно решена для всех режимов нагрузки при помощи только одного подмагничивания инверторного трансформатора. В тех случаях, когда необходимо стабилизировать как величину, так и форму выходного напряжения, на систему подмагничивания следует возложить только одну из этих задач.

Значительно лучшую форму выходного напряжения преобразователя можно получить при инвертировании по какой-либо из шестифазных схем с последующим преобразованием шестифазной системы в трехфазную. Шестифазная схема и без подмагничивания дает достаточно удовлетворительную форму кривой выходного напряжения с небольшим содержанием высших гармонических. Система подмагничивания здесь выполняет только свою основную роль стабилизации выходного напряжения. Попутно при этом несколько улучшается и форма кривой выходного напряжения (рис. 10). Однако при шестифазном инвертировании число вентилей необходимо увеличить. В схеме преобразователя с явно выраженным звеном постоянного тока при трехфазном выпрямлении и шестифазном инвертировании число вентилей девять, а при шестифазном выпрямлении и инвертировании — двенадцать.

Рассмотренные схемы инвертора и преобразователя частоты исследованы при активной и смешанной нагрузке с коэффициентом мощности 0,5...0,6. Асинхронные же двигатели при пуске и в некоторых режимах потребляют значительный реактивный ток, что может вызвать осложнение работы преобразователя, особенно в тех случаях, когда нагрузка в виде двигателей является основной для преобразователя. Поэтому необходимы дальнейшие исследования по выявлению неблагоприятных режимов работы преобразователя частоты, питающего асинхронные двигатели.

Известно также [Л. 8], что в феррорезонансном контуре, составленном из инверторного трансформатора и конденсаторов, возникают низкочастотные колебания. Подмагничивание инверторного трансформатора помогает уничтожить колебания. Одним из методов борьбы с колебаниями является также уменьшение индукции в трансформаторе до 3...4 тыс. *гс*.

Выводы. 1. Подмагничивание инверторного трансформатора позволяет автоматически стабилизировать величину выходного напряжения параллельного инвертора и преобразователя частоты, построенного на основе использования параллельного инвертора.

2. Вместе с решением основной задачи стабилизации выходного напряжения подмагничивание инверторного трансформатора дает возможность поддерживать синусоидальную форму выходного

напряжения параллельного инвертора в широких пределах изменения нагрузки.

3. Благодаря применению инверторного трансформатора с подмагничиванием в схеме преобразователя частоты с трехфазным выходом, обеспечивающей самоликвидацию случайных срывов инвертирования, уменьшено вдвое число вентилей при достаточно удовлетворительной форме выходного напряжения.

4. На основе использования эквивалентной схемы для переменных составляющих параллельного инвертора найдено простое приближенное выражение для выходного напряжения инвертора.

При выполнении настоящей работы ряд ценных советов автору дал проф. И. Л. Каганов и Я. З. Цыпкин.

Литература

1. Д. А. Завалишин. Ионный преобразователь частоты для регулирования скорости асинхронного двигателя. Электричество, № 4, 1939.
2. И. Л. Каганов и М. И. Котылев. Преобразование постоянного тока в однофазный. Электричество, №7, 1936.
3. И. И. Кантер. Теория работы многофазных несамоуправляемых инверторов с конденсаторной коммутацией. Электричество, № 3, 1951.
4. В. Г. Комар. Работа полупроводниковых выпрямителей в цепях управления, Госэнергоиздат, 1952.
5. К. А. Круг. Переходные процессы в линейных электрических цепях, Госэнергоиздат, 1948.
6. Я. З. Цыпкин. Переходные и установившиеся процессы в импульсных цепях. Госэнергоиздат, 1951.
7. Г. И. Шевченко. Авторское свидетельство № 88434 от 9 августа 1950 г.
8. W. Ostendorf. Параллельный инвертор с независимым возбуждением. Arch. f. El., стр. 349, № 6, 1938.
9. И. И. Ратгауз и С. А. Дохман. Глубокое регулирование напряжения постоянного тока дросселями насыщения. Электричество, № 5, 1950.

[21. 6. 1952]

✧ ✧ ✧

К расчету длинной линии постоянного тока в случае зависимости ее параметров от знака потенциала

Н. А. РОСТОВЦЕВ

г. Чаплыгин

Рассматривается кольцевая линия постоянного тока (электролитическая ванна, блуждающие токи в трамвайных сетях и т. п.) с двумя критическими точками. В первой имеется сосредоточенная проводимость, во второй происходит скачкообразное изменение параметров схемы. Положение первой точки фиксировано, вторая точка находится там, где потенциал делается равным нулю. На основе получаемых точных формул автор предлагает для определения потерь и утечек в линии также и приближенные формулы, удобные для пользования в практических расчетах.

Анализируя потери тока и мощности вследствие утечки в серии электролитических ванн, Л. П. Подольский [Л. 1] поставил задачу расчета длинной кольцевой линии с двумя критическими точками. В одной из точек, положение которой задано, имеется сосредоточенная проводимость на землю. В другой, в которой потенциал равен нулю, происходит скачкообразное изменение проводимости утечки G. Ее положение, таким образом, не может быть задано произвольно. Требуется найти положение этой точки и вычислить потери тока и мощности (рис. 1). Л. П. Подольский нашел приближенное решение этой задачи, пользуясь совершенно элементарными средствами. В его решении предполагается, что ток постоянен вдоль линии, т. е. утечка бесконечно мала в сравнении с током, а потому потенциал вдоль линии падает равномерно и потенциалы средних точек ванн, где предполагаются подключенными сосредоточенные утечки, образуют арифметическую прогрессию. Расчетные формулы, полученные этим способом, слишком громоздки из-за наличия членов, доставляющих фиктивную точность, если учесть степень приближения.

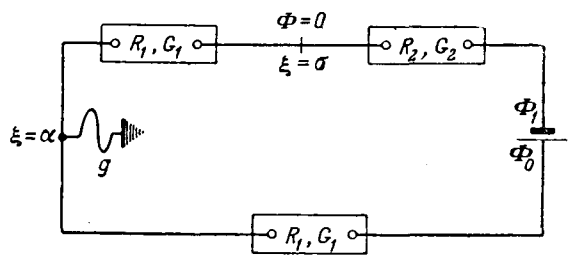


Рис. 1.

В настоящей работе дается точное решение поставленной задачи на основе теории длинной линии. Формулы этого решения упрощаются в случае малых потерь. В целях математической общности мы полагаем, что в точке с нулевым потенциалом меняется не только проводимость G, но и сопротивление R, поскольку это не усложняет расчета.

Общие формулы. Полагаем для простоты длину линии равной 1. Абсциссу ξ отсчитываем от положительного полюса линии. Сосредоточенная проводимость g находится на стороне положительного потенциала $\Phi > 0$, в точке $\xi = \alpha$, а нуль потенциала в точке $\xi = \sigma$, $\sigma > \alpha$.

Проводимость утечки и сопротивление линии имеют значения G_1, R_1 при $\xi < \sigma$, G_2, R_2 при $\xi > \sigma$.

Введем безразмерные параметры:

$$\nu_1 = \sqrt{R_1 G_1};\ \nu_2 = \sqrt{R_2 G_2};\ k = \nu_2/\nu_1;$$
$$q = g/G_1; \qquad (1)$$
$$b = R_2/R_1;\ \psi = R_{экв}/R_1,$$

а также номинальные значения тока и мощности

$$i_n = \frac{U}{R_1};\ P_n = \frac{U^2}{R_1};\ U = \Phi_0 - \Phi_1. \qquad (2)$$

Входной ток I и полная мощность P будут:

$$I = \frac{i_n}{\psi};\ P = \frac{P_n}{\psi}. \qquad (3)$$

Применяя теорию длинной линии, получаем уравнение для абсциссы $\xi = \sigma$ точки нулевого потенциала:

$$\operatorname{ch}\nu_2(1-\sigma) - \operatorname{ch}\nu_1\sigma = q\nu_1 \operatorname{ch}\nu_1\alpha \operatorname{sh}\nu_1(\sigma-\alpha) \qquad (4)$$

(вывод дан в приложении).

Коэффициент эквивалентного сопротивления

$$\psi = \frac{\operatorname{th}\nu_1\tau}{\nu_1} + b\frac{\operatorname{th}\nu_2(1-\sigma)}{\nu_2}, \qquad (5)$$

здесь τ — абсцисса точки, в которой потенциал обращается в нуль, если бы он падал вдоль линии так же, как на участке от $\xi = 0$ до $\xi = \alpha$, т. е. по закону $\operatorname{sh}\nu_1(\tau - \xi)$. Для нее мы имеем формулу

$$\operatorname{th}\nu_1\tau = \operatorname{th}\nu_1\alpha + \frac{\operatorname{sh}\nu_1(\sigma-\alpha)}{\operatorname{ch}\nu_1\alpha \operatorname{ch}\nu_2(1-\sigma)}. \qquad (6)$$

Скачок тока, равный $g\Phi_\alpha$, можно вычислить по формуле, не содержащей g явно:

$$\delta i = i_{\alpha-0} - i_{\alpha+0} = I\frac{\operatorname{ch}\nu_2(1-\sigma) - \operatorname{ch}\nu_1\sigma}{\operatorname{ch}\nu_1\alpha \operatorname{ch}\nu_2(1-\sigma)}. \qquad (7)$$

Это выражение используется в случае глухого заземления, когда $g\Phi_\alpha$ дает неопределенность типа $\infty \cdot 0$.

Ток имеет наименьшее значение в точке $\xi = \sigma$, наибольшее — на концах, $\xi = 0$, $\xi = 1$.

Полной утечкой называем разность $I - i_\sigma$ и ее долю оцениваем коэффициентом

$$\varkappa = \frac{I - i_\sigma}{I} = \frac{\Delta i}{I} = 1 - \frac{1}{\operatorname{ch}\nu_2(1-\sigma)}. \qquad (8)$$

Мощность ΔP в утечке вычисляется через „долю потерь"

$$\lambda = \frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{2}\left\{1 - \frac{\frac{\sigma}{\operatorname{ch}^2\nu_1\tau} + \frac{b(1-\sigma)}{\operatorname{ch}^2\nu_2(1-\sigma)} - (\sigma-\alpha)\left[\frac{1}{\operatorname{ch}^2\nu_1\tau} - \frac{1}{\operatorname{ch}^2\nu_2(1-\sigma)}\right] - \frac{\operatorname{sh}\nu_1(\sigma-\tau)}{\nu_1 \operatorname{ch}\nu_1\tau \operatorname{ch}\nu_2(1-\sigma)}}{\psi}\right\}. \qquad (9)$$

В дальнейшем увидим, что ΔP несколько меньше „перерасхода" $\Delta_1 P = P - P_n$, но это различие весьма мало в сравнении с ΔP, так как отношение $\Delta_1 P/\Delta P$ отличается от единицы на величину второго порядка по сравнению с малым ν_1.

Положение нулевой точки. Корень уравнения (4) заключается между α и $\frac{k}{k+1}$. В случае совпадения $\alpha = \frac{k}{k+1}$ имеем $\tau = \sigma = \alpha$ при произвольном q. Но $\sigma = \frac{k}{k+1}$ и при $q = 0$. Таким образом, точка $\xi = \frac{k}{k+1}$ является особой в том смысле, что подключение произвольной проводимости на землю в этой точке не изменяет состояния линии, остающейся изолированной. Этот случай называем случаем изолированной линии.

Второй особый случай есть случай глухого заземления, $q = \infty$, и, следовательно, $\tau = \sigma = \alpha$, α произвольно.

В общем случае уравнение (4) не имеет алгебраического (буквенного) решения. Оно решается известными приближенными методами.

Если ν_1, ν_2 меньше единицы, то хорошее приближение дает формула

$$\sigma \approx \frac{k^2 + 2q\alpha}{k^2 + q + \sqrt{(k^2+q)^2 - (k^2-q)(k^2+2q\alpha)}}, \qquad (10)$$

которая в практически важном случае $\alpha = \frac{1}{2}$ существенно упрощается:

$$\sigma \approx \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{q+1}{q+k^2}}}. \qquad (10a)$$

В случае $\nu_2 = \nu_1 = \nu$ имеется точное алгебраическое решение:

$$\sigma = \frac{1}{4} + \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{\nu}\operatorname{Arth}\left[\frac{q\operatorname{ch}\nu\alpha - \frac{2}{\nu}\operatorname{sh}\frac{\nu}{2}}{q\operatorname{ch}\nu\alpha + \frac{2}{\nu}\operatorname{sh}\frac{\nu}{2}}\operatorname{th}\nu\left(\frac{1}{4} - \frac{\alpha}{2}\right)\right], \qquad (11)$$

и тогда

$$\tau = \frac{1}{4} + \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{\nu}\operatorname{Arth}\left[\frac{q\operatorname{ch}\nu(1-\alpha) - \frac{2}{\nu}\operatorname{sh}\frac{\nu}{2}}{q\operatorname{ch}\nu(1-\alpha) + \frac{2}{\nu}\operatorname{sh}\frac{\nu}{2}}\operatorname{th}\nu\left(\frac{1}{4} - \frac{\alpha}{2}\right)\right]. \qquad (12)$$

Изолированная линия. В этом случае $\sigma = \frac{k}{k+1}$; $1 - \sigma = \frac{1}{k+1}$. Положим:

$$\mu = \nu_1\sigma = \nu_2(1-\sigma) = \frac{k\nu_1}{k+1} = \frac{\nu_2}{k+1}. \qquad (13)$$

Тогда

$$\psi = \frac{k + b\,\mathrm{th}\,\mu}{k+1}\cdot\frac{\mu}{\mu};\quad \psi\Big|_{b=1} = \frac{\mathrm{th}\,\mu}{\mu}; \tag{5a}$$

$$\varkappa = 1 - \frac{1}{\mathrm{ch}\,\mu}; \tag{8a}$$

$$\lambda = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{2\mu}{\mathrm{sh}\,2\mu}\right). \tag{9a}$$

При $b = 1$ (практически наиболее важный случай) отношение перерасхода к мощности в утечках составляет:

$$\frac{\Delta_1 P}{\Delta P} = \frac{1-\psi}{\lambda} = 1 + \frac{\mu^2}{15} - \frac{2\mu^4}{525} + \ldots \tag{14}$$

Это отношение составляет 1,016 даже при $\mu = 0{,}5$, когда $\lambda = 0{,}0745$, что вряд ли возможно в практике нормальной эксплуатации линии. Поэтому практически $\Delta_1 P = \Delta P$.

Глухое заземление. В этом случае

$$\psi = \frac{\mathrm{th}\,\nu_1\alpha}{\nu_1} + b\,\mathrm{th}\,\frac{\nu_2(1-\alpha)}{\nu_2}, \tag{5b}$$

$$\delta i = I\left[\frac{1}{\mathrm{ch}\,\nu_1\alpha} - \frac{1}{\mathrm{ch}\,\nu_2(1-\alpha)}\right]; \tag{7a}$$

$$\lambda = \frac{1}{2}\left[1 - \frac{\dfrac{\alpha}{\mathrm{ch}^2\,\nu_1\alpha} + b\,\dfrac{1-\alpha}{\mathrm{ch}^2\,\nu_2(1-\alpha)}}{\psi}\right]. \tag{9b}$$

При убывании α от $\alpha = \frac{k}{k+1}$ до $\alpha = 0$ величина ψ монотонно убывает до

$$\psi_{мин} = \psi\Big|_{\alpha=0} = b\,\frac{\mathrm{th}\,\nu_2}{\nu_2},$$

а величина λ монотонно возрастает до

$$\lambda_{макс} = \lambda\Big|_{\alpha=0} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{2\nu_2}{\mathrm{sh}\,2\nu_2}\right).$$

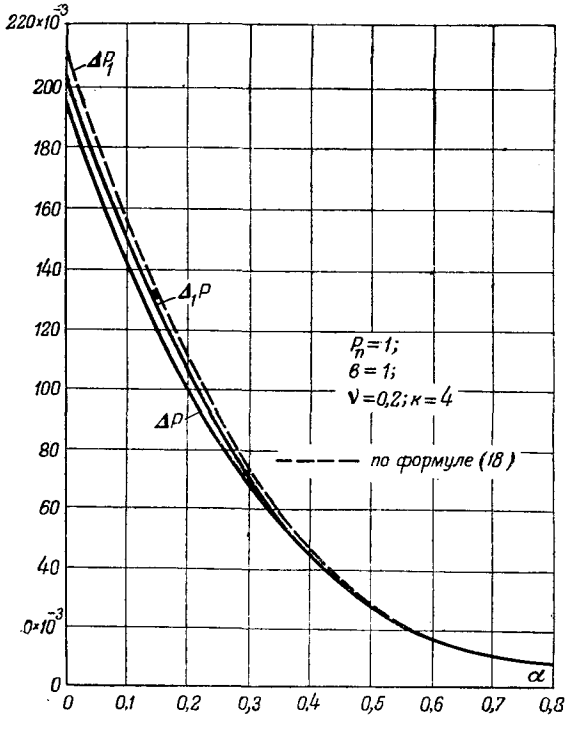


Рис. 2. Потери мощности в случае глухого заземления.

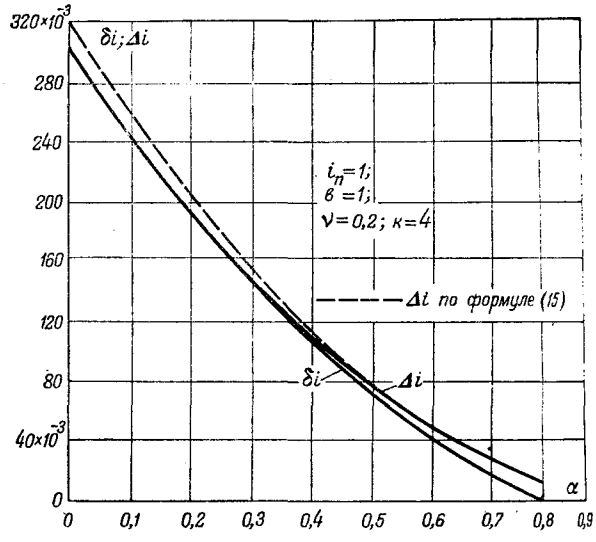


Рис. 3. Полная утечка Δi и скачок тока δi в случае глухого заземления.

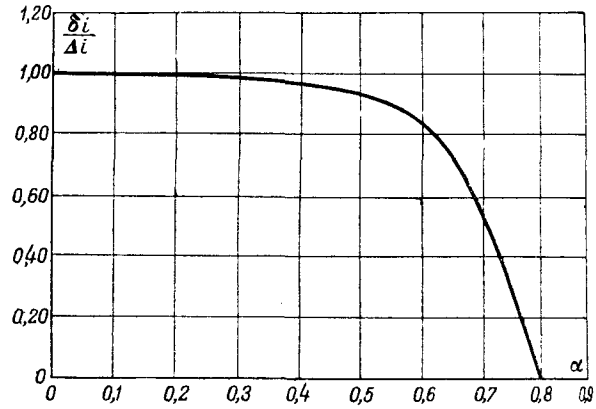


Рис. 4. Доля скачка тока в полной утечке в случае глухого заземления.

На рис. 2 и 3 представлены графики, иллюстрирующие возрастание потерь мощности и утечки тока по мере приближения точки глухого заземления к началу линии. Картина процесса несколько утрирована, так как приняты завышенные по сравнению с действительностью значения $k = 4$, $\nu_1 = 0{,}2$, для того чтобы характерные особенности процесса были выявлены достаточно резко. Принято для простоты $P_n = 1$; $i_n = 1$.

Графики показывают резкое возрастание утечки и потерь мощности при перемещении точки заземления к началу линии. Видно, что в практически важном интервале $0{,}4 \leqslant \alpha \leqslant 0{,}6$ значения $\Delta_1 P$, ΔP фактически совпадают. Что касается утечки, то ее величина, даже при незначительном удалении точки заземления от критической точки, почти целиком обусловлена величиной скачка тока (рис. 4). Это достаточно выясняет роль глухого заземления в образовании потерь: поскольку потеря мощности в самой сосредоточенной проводимости равна нулю, то заземление только перераспределяет силу тока невыгодным образом.

Приближенные формулы. При нормальных условиях эксплуатации потери мощности не выше

$0{,}005P_n$. Поэтому $\nu_1 \approx 0{,}1 \ldots 0{,}3$. При таких малых значениях ν_1 удобнее применять приближенные формулы, представляющие начальные члены разложений точных формул по степеням ν_1.

Тогда $\sigma \approx \tau$ и эпюра потенциала становится прямолинейной, значение же i — постоянным. Нулевая точка определяется по формуле (10) без дальнейших уточнений.

Полная утечка.

$$\Delta i = i_n \frac{\nu_1^2}{2} k^2 (1-\sigma^2) = \frac{1}{2} G_1 U k^2 (1-\sigma)^2. \quad (15)$$

Скачок тока

$$\delta i = i_n \frac{\nu_1^2}{2} [k^2 (1-\sigma)^2 - \sigma]^2 =$$

$$= \frac{1}{2} G_1 U [k^2 (1-\sigma)^2 - \sigma^2]. \quad (16)$$

Для потерь мощности при $b=1$ получаем: в случае конечных значений q

$$\Delta P = P_n \frac{\nu_1^2}{3} [\sigma^3 + k^2 (1-\sigma)^3 + 3q(\sigma-\alpha)]^2 =$$

$$= \frac{1}{3} G_1 U^2 [\sigma^3 + k^2 (1-\sigma)^3 + 3q(\sigma-\alpha)^2]; \quad (17)$$

в случае глухого заземления

$$\Delta P = P_n \frac{\nu_1^2}{3} [\alpha^3 + k^2 (1-\alpha)^3] =$$

$$= \frac{1}{3} G_1 U^2 [\alpha^3 + k^2 (1-\alpha)^3]. \quad (18)$$

Для линии, заземленной в критической точке (изолированной), потери

$$\Delta P_{мин} = \frac{1}{3} G_1 U^2 \left(\frac{k}{k+1}\right)^2,$$

для линии же, наглухо заземленной в середине,

$$\Delta P = \frac{1}{3} G_1 U^2 \frac{k^2+1}{8}.$$

Таким образом, потери при таком способе заземления возрастают по сравнению с минимальными в отношении

$$\frac{k^2+1}{8} : \left(\frac{k}{k+1}\right)^2.$$

Это отношение равно 2,2 при $k=3$ и 3,3 при $k=4$. Очевидно, при такой асимметрии линии заземление средней точки экономически невыгодно.

Приближенные формулы можно получить элементарно, исходя из прямолинейной эпюры потенциала (рис. 5) и заменяя условие равенства тока на входе и выходе эквивалентным условием

$$\int_0^1 G\Phi d\tau + g\Phi_\alpha = 0.$$

Интеграл, стоящий в этой формуле, представляет площадь эпюры утечек

$$j = \frac{di}{d\rho} = -G\Phi,$$

и элементарный подсчет приводит к формулам (10), (15), (16).

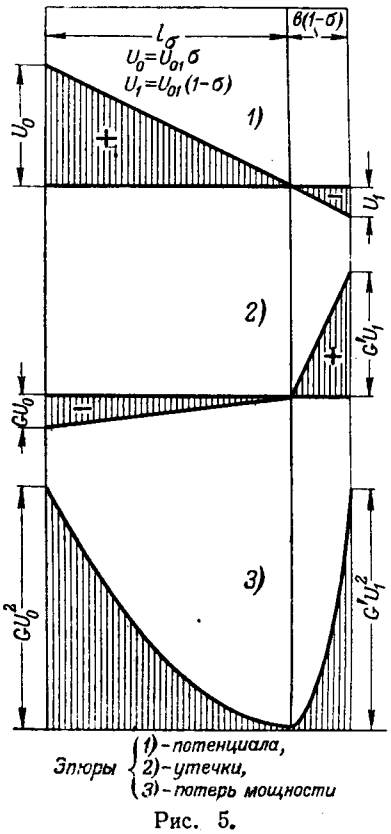


Рис. 5.

1 — эпюра потенциала ($U_{01} = U_0 - U_1$); *2* — утечка через распределенную проводимость $\left[\frac{1}{2} GU_0 l\sigma = \frac{1}{2} lGU_{01}\delta_1^2\right.$ — на стороне положительного потенциала; $\left.\frac{1}{2} G'U_1 l(1-\sigma) = \frac{1}{2} lGU_{01} \cdot k^2 (1-\sigma^2)\right.$ — на стороне отрицательного потенциала]; *3* — потеря мощности $\left[\frac{1}{3} GU_0^2 l\sigma = \frac{1}{3} lGU_{01}^2 \sigma^3\right.$ — на стороне положительного потенциала и $\frac{1}{3} lG'U_1^2 l(1-\sigma) = \frac{1}{3} lGU_{01}^2 k^2 (1-\delta^2)$ — на стороне отрицательного потенциала $\left.\right]$.

Перемножение эпюр дает эпюру мощности, расходуемой в утечках, на единицу длины. Площадь этой параболической эпюры вместе со слагаемым $g\Phi_\alpha^2$ дает потерянную мощность. Так приходим к формулам (15) и (18).

Наши приближенные формулы дают те же численные результаты, что и формулы Л. П. Подольского. Но последние отличаются от наших формул усложненностью, связанной с наличием членов, доставляющих фиктивную точность. Поэтому формулы Л. П. Подольского требуют применения арифмометра для получения численных результатов с той точностью, какая достигается вычислениями со счетной линейкой по формулам (15) и (18).

Эта же усложненность формул служит препятствием к их анализу в общем виде.

Л. П. Подольский ограничился лишь рассмотрением численного примера. Данные этого примера таковы:

$$U = 417\ в,\ G_1^{-1} = 1\,237\ ом;\ G_2^{-1} = 119{,}5\ ом;$$

$$g = 0{,}992\ ом^{-1};\ a = \frac{1}{2};$$

число ванн $n = 75$.

Расчет по формулам (10), (15), (17) с применением счетной линейки дает:

$$n\sigma = 41{,}5;\ \Delta i = 26\ а;\ \Delta P = 4{,}35\ квт.$$

Расчет по формулам Л. П. Подольского с применением арифмометра дает:

$$n\sigma = 41{,}9;\ \Delta i = 26\ а;\ \Delta P = 4{,}35\ квт.$$

В работе (1) ошибочно напечатано

$$n\sigma = 39{,}2;\ \Delta i = 9{,}47\ а.$$

Заключение. В работе даны точные расчетные формулы длинной линии постоянного тока с параметрами, зависящими от знака потенциала, изолированной или заземленной на стороне положительного потенциала, а также произведен общий анализ потерь в такой линии.

Из точных формул выведены приближенные, которыми удобно пользоваться в большинстве практических расчетов. Эти приближенные формулы значительно проще известных к настоящему времени формул Л. П. Подольского.

Приложение. Согласно формулам длинной линии имеем:

в точке $\xi = \sigma$

$$i_\sigma = \frac{I}{\operatorname{ch} \nu_2 (1 - \sigma)}; \qquad (I,1)$$

в точке $\xi = \alpha$

$$\Phi_\alpha = i_\sigma Z_1 \operatorname{sh} \nu_1 (\sigma - \alpha) = IZ_1 \frac{\operatorname{sh} \nu_1 (\sigma - \alpha)}{\operatorname{ch} \nu_2 (1 - \sigma)}; \qquad (I,2)$$

$$i_{\alpha+0} = i_\sigma \operatorname{ch} \nu_1 (\sigma - \alpha) = \frac{I \operatorname{ch} \nu_1 (\sigma - \alpha)}{\operatorname{ch} \nu_2 (1 - \sigma)}; \qquad (I,3)$$

В той же точке

$$i_{\alpha-0} = i_{\alpha+0} + \delta i = i_{\alpha+0} + g\Phi_\alpha. \qquad (I,4)$$

Подставляя (I,2) и (I,3) в (I,4), получим:

$$i_{\alpha-0} = \frac{I}{\operatorname{ch} \nu_2 (1 - \sigma)} [\operatorname{ch} \nu_1 (\sigma - \alpha) + \nu_1 q \operatorname{sh} \nu_1 (\sigma - \alpha)], \qquad (I,5)$$

так как

$$gZ_1 = g \frac{\nu_1}{G_1} = \nu_1 q.$$

Подставляя (I,2) и (I,5) в тождество

$$\Phi_\alpha \operatorname{sh} \nu_1 \alpha + i_{\alpha-0} Z_1 \operatorname{ch} \nu_1 \alpha = IZ_1, \qquad (I,6)$$

получим после приведений искомое уравнение

$$\operatorname{ch} \nu_2 (1 - \sigma) - \operatorname{ch} \nu_1 \sigma = \nu q_1 \operatorname{ch} \nu_1 \alpha \operatorname{sh} \nu_1 (\sigma - \alpha). \qquad (4)$$

Потенциал на входе получаем из тождества

$$\Phi_0 = \Phi_\alpha \operatorname{ch} \nu_1 \alpha + i_{\alpha-0} Z_1 \operatorname{sh} \nu_1 \alpha, \qquad (I,7)$$

подстановка в которое выражений (I,2) и (I,5) дает:

$$\Phi_0 = IZ_1 \frac{\operatorname{sh} \nu_1 \sigma + \nu_1 q \operatorname{sh} \nu_1 \alpha \operatorname{sh} \nu_1 (\sigma - \alpha)}{\operatorname{ch} \nu_2 (1 - \sigma)}. \qquad (I,8)$$

Отсюда, принимая во внимание (4), после упрощений получим:

$$\Phi_0 = IZ_1 \left[\operatorname{th} \nu_1 \alpha + \frac{\operatorname{sh} \nu_1 (\sigma - \alpha)}{\operatorname{ch} \nu_1 \alpha \operatorname{ch} \nu_2 (1 - \sigma)} \right]. \qquad (I,9)$$

Но потенциал может быть выражен также формулой

$$\Phi_0 = IZ_1 \operatorname{th} \nu_1 \tau, \qquad (I,10)$$

где τ — абсцисса точки, в которой $\Phi = 0$ при аналитическом продолжении за границу участка $0 < \xi < 1$. Следовательно,

$$\operatorname{th} \nu_1 \tau = \operatorname{th} \nu_1 \alpha + \frac{\operatorname{sh} \nu_1 (\sigma - \alpha)}{\operatorname{ch} \nu_1 \alpha \operatorname{ch} \nu_2 (1 - \sigma)}. \qquad (6)$$

В то же время

$$\Phi_1 = -IZ_2 \operatorname{th} \nu_2 (1 - \sigma). \qquad (I,11)$$

Образуя разность $U = \Phi_0 - \Phi_1$, находим, что эквивалентное сопротивление

$$R_{экв} = Z_1 \operatorname{th} \nu_1 \tau + Z_2 \operatorname{th} \nu_2 (1 - \sigma), \qquad (I,12)$$

а следовательно, коэффициент $\psi = R_{экв}/R_1$ будет:

$$\psi = \frac{\operatorname{th} \nu_1 \tau}{\nu_1} + b \frac{\operatorname{th} \nu_2 (1 - \sigma)}{\nu_2}. \qquad (5)$$

Литература

1. Л. П. Подольский. Влияние заземления нейтрали сетей низкого напряжения на условия безопасности. Госэнергоиздат, 1946.

[25. 4. 1952]

◇ ◇ ◇

О моделировании электромагнитного аппарата переменного тока электрической цепью

Кандидат техн. наук **А. С. РОЗЕНКРАНЦ**

Ивановский энергетический институт им. Ленина

Предлагаемые схемы замещения моделируют одновременно и электрическую и магнитную цепи аппарата. Схема, моделирующая электрическую цепь аппарата, связывается со схемой, моделирующей его магнитную цепь, трансформаторами, коэффициенты трансформации которых определяются числами витков соответствующих обмоток моделируемого аппарата. В работе дается общий метод, позволяющий по конфигурации электрической и магнитной цепей аппарата найти конфигурацию его схемы замещения, каждая ветвь которой соответствует определенной ветви магнитной и электрической цепи. Выводятся необходимые соотношения моделирования. Указываются возможные практические применения предлагаемых схем.

Любую магнитную цепь можно моделировать электрической цепью [Л. 1, 2]. В случае постоянного тока такое моделирование не встречает затруднений, так как токи в обмотках, а следовательно, и н. с., можно рассчитать заранее, независимо от потокораспределения в магнитной цепи. В электромагнитных аппаратах переменного тока и при переходных процессах в аппаратах постоянного тока уравнения магнитной и электрической цепей связаны и должны решаться совместно.

Поставим задачу, — зная конфигурацию и параметры магнитных и электрических цепей электромагнитного аппарата, построить из физически осуществимых сосредоточенных элементов такую электрическую схему, которая одной своей частью моделировала бы магнитные цепи аппарата, другой частью — его электрические цепи, а в целом была бы эквивалентна данному аппарату.

Предлагаемые схемы могут упростить и ускорить проектирование, расчет и исследование электромагнитных аппаратов переменного тока со сложной магнитной и электрической схемами (реле, измерительные приборы, специальные трансформаторы, аппараты с подмагничиванием, феррорезонансные стабилизаторы и т. п.). В ряде случаев целесообразно применение предлагаемых методов и соотношений для решения обратной задачи, при которой задается схема, состоящая из отдельных элементов электрической цепи, и требуется построить эквивалентный этой схеме электромагнитный аппарат, имеющий единый магнитопровод. Такой аппарат часто может оказаться более компактным и экономичным по расходу материалов, чем исходная схема.

Сведения из геометрии электрических и магнитных цепей. Два геометрических, точнее топологических, понятия неразрывно связаны с уравнениями электрических и магнитных цепей: 1) *замкнутый контур*, для него составляется уравнение второго закона Кирхгофа; 2) *совокупность всех ветвей*, соединяющих между собой две части цепи, расположенные по разные стороны замкнутой поверхности. Другими словами, это совокупность тех ветвей, которые надо перерезать, чтобы схема распалась на две несвязанные части.

Такую совокупность ветвей (для нее составляется уравнение первого закона Кирхгофа) удобно называть *связующей совокупностью*. Примеры связующих совокупностей даны на рис. 1,*б*—ветви *1, 2, 3* или *1, 2, 4*; на рис. 1,*г*—*3, 1, 10, 9, 8, 11* или *3, 2, 9, 5, 6* или *4, 10, 9, 8, 11* и т. д.

Частным случаем связующей совокупности является узел — несколько ветвей, соединенных в одной точке.

Схемами *взаимно-обратной конфигурации* будем называть любые две схемы, между ветвями которых можно установить такое взаимно однозначное соответствие, что если в одной из схем какие-либо ветви образуют замкнутый контур, то в другой схеме соответствующие ветви всегда образуют связующую совокупность и, наоборот, любой связующей совокупности одной схемы соответствует замкнутый контур другой схемы. Примеры таких схем приведены на рис. 1 (схемы, стоящие слева, обратны соответствующим схемам, стоящим справа).

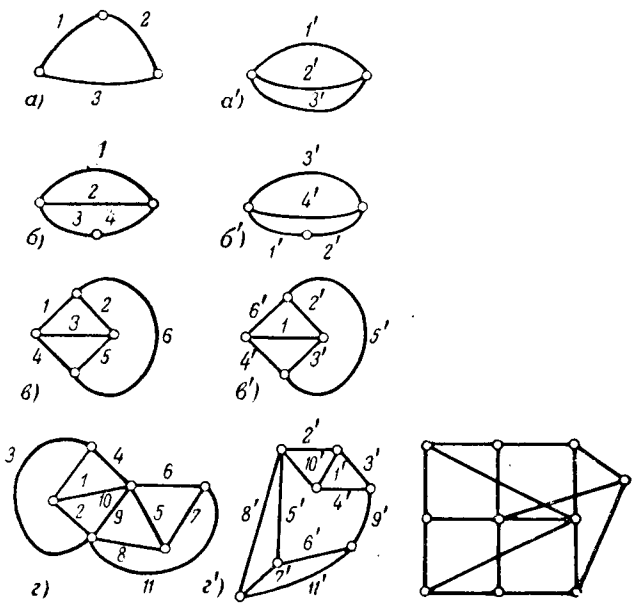


Рис. 1. Примеры схем взаимно-обратной конфигурации.

Рис. 2. Пример необратимой схемы.

В литературе взаимно-обратные конфигурации называются также дуальными или двойственными.

Схемы, для которых возможно построение обратной конфигурации, будем называть обратимыми. Как известно [Л. 3], обратимыми являются только те схемы, которые могут быть без самопересечений изображены на плоскости или другой односвязной поверхности.

В топологии такие схемы называются плоскими, что надо понимать лишь в смысле возможности их изображения без самопересечений на плоскости (в действительности схема может иметь пространственное расположение ветвей).

Необратимые («неплоские») схемы (пример такой схемы дан на рис. 2) встречаются весьма редко.

Практическое построение схемы, имеющей конфигурацию, обратную заданной (если схема обратима), не представляет труда. Начинать построение удобно с какого-либо узла, который преобразуется в замкнутый контур обратной схемы. Ветвь, соединяющая в исходной схеме два узла, в обратной схеме должна быть общей для соответствующих двух замкнутых контуров. Учитывая это обстоятельство и переходя от одного узла к другому (смежному), нетрудно построить всю схему. В частном случае схем, образованных только последовательно-параллельными соединениями, обратная схема строится путем простой замены последовательных соединений параллельными, а параллельных — последовательными (рис. 1,*б*).

Вопросы конфигурации электрических цепей рассмотрены в [Л. 3], где имеются также ссылки на специальную литературу. Некоторые свойства взаимно-обратных конфигураций разобраны в [Л. 4, стр. 93...105].

Исходные уравнения. Всякий электромагнитный аппарат состоит из более или менее сложной магнитной цепи, на отдельных ветвях которой размещены обмотки, включенные в некоторую электрическую схему. Обратимся к уравнениям такого аппарата. Сначала рассмотрим случай линейных цепей и синусоидально изменяющихся величин. В уравнениях магнитной цепи будем использовать введенное проф. В. К. Аркадьевым [Л. 1] понятие комплексного магнитного сопротивления и проводимости. Для удобства в уравнениях второго закона Кирхгофа э. д. с. и н. с. будем переносить в левую часть, заменяя их взятым с обратным знаком электрическим или магнитным напряжением равной величины.

Рабочее состояние любого электромагнитного аппарата определяется уравнениями следующих восьми видов:

Уравнения электрических цепей аппарата

Для каждой связующей совокупности Q $\sum_{(Q)} I_i = 0$ (1)

Для каждого замкнутого контура C $\sum_{(C)} \dot{U}_i = 0$ (2)

Для каждой пассивной ветви $Z \cdot \dot{I} = \dot{U}$ (3)

Уравнения магнитных цепей аппарата

Для каждой связующей совокупности P $\sum_{(P)} \dot{\Phi}_i = 0$ (4)

Для каждого замкнутого контура G $\sum_{(G)} \dot{U}_{mi} = 0$ (5)

Для каждой ветви, не содержащей н. с. $Z_m \dot{\Phi} = \dot{U}_m$ (6)

Для каждой обмотки $\dot{U}_o = w j \omega \dot{\Phi}_o$, (7)

где $\dot{U}_o = -\dot{E}$

Для той же обмотки $\dot{U}_{mo} = -w\dot{I}_o$, (8)

где $\dot{U}_{mo} = -\dot{E}_m$

В этих уравнениях $\dot{I}$ — электрический ток; $\dot{U}$ — электрическое напряжение; $\dot{E}$ — э. д. с.; Z — комплексное электрическое сопротивление; Φ — магнитный поток; $\dot{U}_m$ — магнитное напряжение; $\dot{E}_m$ — н. с; Z_m — комплексное магнитное сопротивление $j = \sqrt{-1}$; ω — угловая частота, i — индекс суммирования; o — индекс, отмечающий величины, относящиеся к обмоткам.

На рис. 3 изображена обмотка аппарата, для которой написаны уравнения (7) и (8). Электрическое сопротивление обмотки (Z) и магнитное сопротивление стержня, на котором она расположена (Z_m), представлены, как обычно, сосредоточенными вне обмотки, что, очевидно, не нарушает общности вывода.

Изображенная на рис. 3 часть электромагнитного аппарата представляет собой своеобразный четырехполюсник, связывающий магнитную цепь с электрической и характеризуемый на одной стороне электрическими напряжением и током, а на другой — магнитным напряжением и потоком.

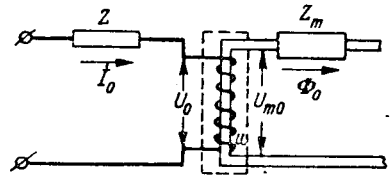


Рис. 3. Электромагнитный четырехполюсник.

Для обведенного пунктиром на рис. 3 *простейшего электромагнитного четырехполюсника* выполняются соотношения (7), (8), что же касается электрического и магнитного сопротивлений, то они учитываются в уравнениях вида (3) и (6).

Наша схема замещения аппарата будет по условию состоять из двух электрических схем, одна из которых моделирует электрическую, а другая — магнитную часть аппарата. Совместное их моделирование требует прежде всего введения четырехполюсников, связывающих эти две схемы и моделирующих, таким образом, упомянутые «простейшие электромагнитные четырехполюсники» (обведенная пунктиром часть рис. 3). Если учесть, что, очевидно, в общем случае в схеме замещения, эквивалентной аппарату, не должно быть электрической связи между частями ее, одна из которых моделирует электрические цепи аппарата, а другая — его магнитные цепи, наибо-

лее подходящим четырехполюсником для связи этих частей схемы является трансформатор. Это вполне естественно, так как трансформатор в идеальном случае представляет собой как раз сочетание двух «простейших электромагнитных четырехполюсников», соединенных магнитными сторонами.

Напряжения и токи такого идеального трансформатора связаны следующими известными уравнениями (с достаточной точностью выполняющимися и для реального трансформатора):

$$\dot{U}_{\text{I}} = n \cdot \dot{U}_{\text{II}}, \tag{9}$$

$$\dot{I}_{\text{II}} = -n \cdot \dot{I}_{\text{I}}, \tag{10}$$

где $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$ — напряжения, а $\dot{I}_{\text{I}}$ и $\dot{I}_{\text{II}}$ — токи соответственно на зажимах *I* и *II* трансформатора (рис. 4); n — коэффициент трансформации.

В дальнейшем для определенности при использовании уравнений вида (9) и (10) будем стороной *I* считать сторону, подключенную к схеме, моделирующей электрическую часть аппарата, а стороной *II* — подключенную к схеме, моделирующей магнитную часть аппарата.

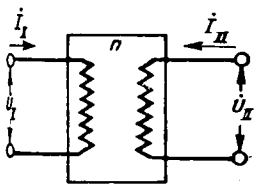


Рис. 4. Условное обозначение трансформатора.

Между величинами схемы замещения и величинами моделируемого аппарата должны быть установлены однозначные соотношения подобия. Конфигурацию схемы замещения необходимо к тому же выбрать так, чтобы эти соотношения подобия соблюдались в любом режиме работы аппарата. Каждому уравнению моделируемого аппарата должно соответствовать поэтому аналогичное по форме уравнение схемы замещения. Соотношения подобия для моделирования электрической и магнитной цепей аппарата не могут быть выбраны независимо, поскольку есть уравнения (7) и (8), связывающие магнитные и электрические величины. Указанные уравнения представляют поэтому особый интерес. Сравнивая уравнения вида (9) и (10) с уравнениями вида (7) и (8), легко заметить их сходство. Однако, в то время как уравнения (9) и (10) связывают одноименные величины (напряжение — с напряжением, ток — с током), уравнения (7) и (8) связывают разноименные величины. Если потребовать, чтобы напряжение $\dot{U}_{\text{I}}$ и ток $\dot{I}_{\text{I}}$ схемы замещения моделировали соответственно напряжение $\dot{U}_o$ и ток $\dot{I}_o$ аппарата, то напряжение $\dot{U}_{\text{II}}$ должно моделировать величину $j\omega\Phi_o$, а ток $\dot{I}_{\text{II}}$ должен моделировать магнитное напряжение $\dot{U}_{mo}$. Удовлетворяющая этим требованиям схема будет в электрическом отношении эквивалентна данному аппарату (или будет отличаться от него только масштабом величин). Такую схему мы будем называть *прямой схемой замещения.*

Есть, однако, возможность построения и другой схемы. Если исходить из моделирования магнитного потока электрическим током, а магнитного напряжения — электрическим напряжением, получится схема, электрические характеристики которой обратны электрическим характеристикам моделируемого аппарата. Такую схему будем называть *обратной схемой замещения.*

Перейдем к разбору указанных схем.

Прямая схема замещения. Как было указано выше, в этой схеме должны соблюдаться прямые соотношения моделирования для электрической части аппарата:

$$Z^* = m_Z \cdot Z, \tag{11}$$

$$\dot{I}^* = m_I \cdot \dot{I}, \tag{12}$$

$$\dot{U}^* = m_U \cdot \dot{U}, \tag{13}$$

$$m_U = m_Z \cdot m_I, \tag{14}$$

где величины, отмеченные звездочкой (*), относятся к той части схемы замещения, которая моделирует электрическую часть аппарата, а величины без звездочки — к соответствующим ветвям самого аппарата;

m_Z, m_I, m_U — масштабы моделирования соответственно сопротивлений, токов, напряжений.

Соотношение (14) вытекает из сопоставления уравнения закона Ома (3) и аналогичного уравнения соответствующей ветви схемы замещения.

Если токи и напряжения аппарата удовлетворяют уравнениям вида (1) и (2), токи и напряжения схемы замещения, определенные из (12) и (13), очевидно, также будут удовлетворять уравнениям вида (1) и (2) при условии, что конфигурация схемы замещения в части, моделирующей электрическую схему аппарата, совпадает с конфигурацией последней схемы.

Для трансформатора, моделирующего обмотку аппарата, имеем:

$$\dot{U}_o^* = n^* \cdot \dot{U}_o^{**}, \tag{15}$$

$$\dot{I}_o^{**} = -n^* \cdot \dot{I}_o^*, \tag{16}$$

где n^* — коэффициент трансформации;

$$\dot{U}_o^* = m_U \cdot \dot{U}_o \tag{17}$$

— напряжение на обмотке трансформатора, обращенной к схеме замещения электрической цепи;

$$\dot{I}_o^* = m_I \cdot \dot{I}_o \tag{18}$$

— ток в этой же обмотке трансформатора;

$\dot{U}_o^{**}$ и $\dot{I}_o^{**}$ — напряжение и ток в обмотке трансформатора, включенной в схему замещения магнитной цепи аппарата.

В дальнейшем двумя звездочками (**) будем отмечать все величины, относящиеся к той части схемы замещения, которая моделирует магнитную цепь аппарата.

Подставляя (17) и (18) в (15) и (16) и сравнивая полученные уравнения соответственно с (7) и (8), замечаем, что коэффициент трансформации n^* и число витков w соответствующей обмотки занимают в уравнениях аналогичные места. Поскольку масштабы моделирования магнитных напряжений и потоков еще не определены, можно положить:

$$n^* = m_w \cdot w, \tag{19}$$

где m_w — масштаб моделирования чисел витков.

Тогда из произведенного сопоставления уравнений непосредственно следует:

$$\dot{U}_o^{**} = \frac{m_U}{m_w} \cdot j\omega\dot{\Phi}_o = \frac{m_Z \cdot m_I}{m_w} \cdot j\omega\dot{\Phi}_o, \tag{20}$$

$$\dot{I}_o^{**} = m_w \cdot m_I \cdot \dot{U}_m. \tag{21}$$

Эти соотношения будут соблюдены, если для всей схемы замещения магнитной части аппарата принять соотношения

$$\dot{U}^{**} = m_\Phi \cdot j\omega\dot{\Phi}, \tag{22}$$

$$\dot{I}^{**} = m_{U_m} \cdot \dot{U}_m, \tag{23}$$

где m_ν и m_{U_m} — масштабы моделирования соответственно магнитных потоков и магнитных напряжений:

$$m_\Phi = \frac{m_Z \cdot m_I}{m_w}, \tag{24}$$

$$m_{U_m} = m_w \cdot m_I. \tag{25}$$

Для пассивной ветви схемы замещения, моделирующей соответствующую магнитную ветвь аппарата, очевидно,

$$\dot{U}^{**} = Z^{**}\dot{I}^{**}, \tag{26}$$

где Z^{**} — комплексное электрическое сопротивление данной ветви схемы замещения.

Сравнивая уравнение вида (26) с уравнением вида (6) для соответствующей ветви и учитывая соотношения (22) и (23), получим:

$$Z^{**} = m_{Y_m} \cdot j\omega Y_m, \tag{27}$$

где m_{Y_m} — масштаб моделирования магнитных проводимостей, равный:

$$m_{Y_m} = \frac{m_\Phi}{m_{U_m}}, \tag{28}$$

$$Y_m = \frac{1}{Z_m}$$

— магнитная проводимость соответствующей ветви магнитной цепи аппарата.

Для моделирования мощностей в прямой схеме замещения, как нетрудно убедиться, будут иметь место следующие соотношения:

$$P^* = m_P \cdot P, \tag{29}$$

$$P^{**} = m_P \cdot P_{(m)}, \tag{30}$$

где P — комплекс мощности в электрической части аппарата:

$$P = \dot{U} \cdot \hat{I}; \tag{31}$$

$P_{(m)}$ — комплекс мощности в магнитной части аппарата:

$$P_{(m)} = j\omega\dot{\Phi} \cdot \hat{U}_m; \tag{32}$$

m_P — масштаб мощностей:

$$m_P = m_Z \cdot m_I^2. \tag{33}$$

Как видно из соотношений (29) и (30), закон и масштаб моделирования мощностей одинаковы для электрической и магнитной частей аппарата, что вполне естественно, так как в противном случае нарушался бы закон сохранения энергии.

Подставляя далее в уравнения вида (4) и (5)

$$\dot{\Phi}_i = \frac{\dot{U}_i^{**}}{j\omega m_\Phi} \quad \text{и} \quad \dot{U}_{mi} = \frac{\dot{I}_i^{**}}{m_{U_m}},$$

получим:

$$\sum_{(P^{**})} \dot{U}_i^{**} = 0, \tag{34}$$

$$\sum_{(G^{**})} \dot{I}_i^{**} = 0, \tag{35}$$

где P^{**} и G^{**} — совокупности ветвей схемы замещения, в которые должны перейти связующая совокупность P и замкнутый контур G аппарата.

Как видим, уравнение первого закона Кирхгофа (4) превратилось в уравнение второго закона Кирхгофа (34), а вместо уравнения второго закона Кирхгофа (5) получилось уравнение первого закона Кирхгофа (35). Уравнения (34) и (35) будут справедливыми лишь при условии, что совокупность ветвей P^{**} является замкнутым контуром, а G^{**} — связующей совокупностью.

Таким образом, каждый замкнутый контур магнитной цепи аппарата должен перейти в связующую совокупность, а каждая связующая совокупность магнитной цепи аппарата — в замкнутый контур соответствующей части схемы замещения.

Другими словами, в прямой схеме замещения аппарата магнитная цепь моделируется электрической схемой обратной конфигурации.

Обратная схема замещения. Схема получится, если потребовать, чтобы прямые соотношения моделирования соблюдались для магнитной части аппарата:

$$Z'^{**} = m'_{Z_m} \cdot Z_m, \tag{36}$$

$$\dot{I}'^{**} = m'_{\Phi} \cdot \dot{\Phi}, \tag{37}$$

$$\dot{U}'^{**} = m'_{U_m} \cdot \dot{U}_m, \tag{38}$$

$$m'_{U_m} = m'_{Z_m} \cdot m'_{\Phi}, \tag{39}$$

где величины, относящиеся к обратной схеме замещения, кроме вышеуказанных индексов отмечены штрихом; m'_{Z_m}, m'_{Φ}, m'_{U_m} — масштабы моделирования соответственно магнитных сопротивлений, потоков и магнитных напряжений в обратной схеме замещения.

Рассуждения в случае обратной схемы замещения аналогичны тем, которые проводились для прямой схемы замещения, но то, что там относилось к моделированию электрической части аппарата, здесь (в обратной схеме) относится к моделированию магнитной его части, и наоборот.

Нетрудно видеть, что конфигурация обратной схемы замещения в части, моделирующей магнитную схему аппарата, совпадает с конфигурацией последней.

Для трансформатора, связывающего модель магнитной цепи с моделью электрической цепи, имеем:

$$\dot{U}'^{*}_{o} = n'^{*} \dot{U}'^{**}_{o}, \tag{40}$$

$$\dot{I}'^{**}_{o} = -n'^{*} \dot{I}'^{*}_{o}, \tag{41}$$

где n'^{*} — коэффициент трансформации;

$$\dot{U}'^{**}_{o} = m'_{U_m} \dot{U}_{mo}, \tag{42}$$

$$\dot{I}'^{**}_{o} = m'_{\Phi} \cdot \dot{\Phi}_{o}. \tag{43}$$

Сравнивая соотношения (40) и (41) с (7) и (8), получим:

$$n'^{*} = \frac{m'_{w}}{w}, \tag{44}$$

$$\dot{U}'^{*} = -m'_{I} \cdot \dot{I}, \tag{45}$$

$$\dot{I}'^{*} = -m'_{U} \cdot \frac{1}{j\omega} \cdot \dot{U}. \tag{46}$$

Далее, из (3), (45), (46) следует:

$$Z'^{*} = m'_{Y} \cdot j\omega Y, \tag{47}$$

где $Y = \frac{1}{Z}$ — электрическая проводимость;

m'_{w} — масштаб моделирования чисел витков;

m'_{U}, m'_{I} и m'_{Y} — масштабы моделирования соответственно электрического напряжения, тока и проводимости, определяемые из следующих соотношений:

$$m'_{I} = m'_{w} \cdot m'_{U_m}, \tag{48}$$

$$m'_{U} = \frac{m'_{\Phi}}{m'_{w}}, \tag{49}$$

$$m'_{Y} = m'^{2}_{w} \cdot \frac{m'_{U_m}}{m'_{\Phi}}. \tag{50}$$

Для моделирования мощностей в обратной схеме замещения нетрудно получить следующие соотношения:

$$P'^{*} = m'_{P} \cdot \frac{1}{j\omega} \cdot \hat{P}, \tag{51}$$

$$P'^{**} = m'_{P} \cdot \frac{1}{j\omega} \cdot \hat{P}_{(m)}, \tag{52}$$

где $\hat{P}$ и $\hat{P}_{(m)}$ — сопряженные комплексы мощности в электрической и магнитной части аппарата;

P'^{*} и P'^{**} — комплексы мощности в соответствующих частях схемы замещения;

m'_{P} — масштаб моделирования мощностей в обратной схеме замещения:

$$m'_{P} = m'_{Z_m} \cdot m'^{2}_{\Phi}. \tag{53}$$

Из (51) и (52) видно, что в обратной схеме замещения активная мощность моделируется реактивной, и наоборот. Кроме того, в соотношения моделирования входит частота.

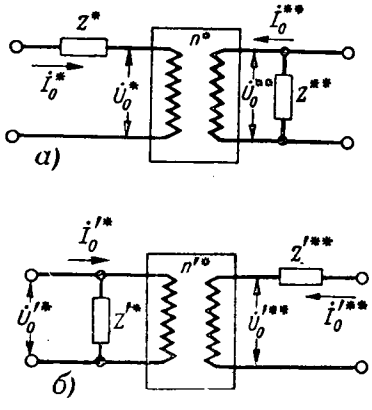


Рис. 5. Прямая *а* и обратная *б* схемы замещения электромагнитного четырехполюсника рис. 3.

Наконец, подставляя в (1) и (2) ток и напряжение аппарата, выраженные из соотношений (45) и (46), убеждаемся, что уравнение первого закона Кирхгофа, составленное для электрической цепи аппарата, соответствует уравнению второго закона Кирхгофа для соответствующих ветвей обратной схемы замещения, а уравнение второго закона Кирхгофа для электрической цепи аппарата превращается в уравнение первого закона Кирхгофа для обратной схемы замещения.

Следовательно, в обратной схеме замещения электрическая часть аппарата моделируется схемой обратной конфигурации.

Сказанное выше о прямой и обратной схемах замещения иллюстрируется рис. 5 и 6.

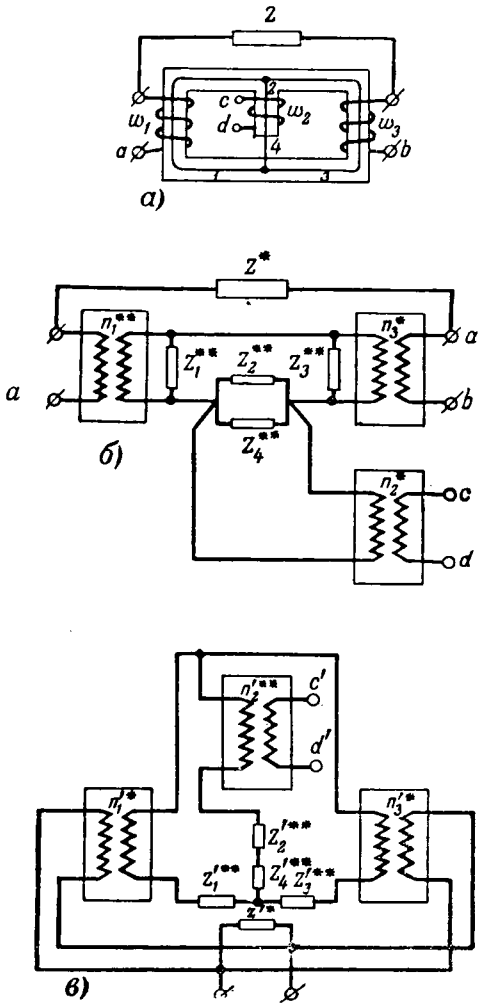


Рис. 6. Пример схем замещения.
а — аппарат; *б* — прямая схема замещения; *в* — обратная схема замещения.

На рис. 5 изображена часть прямой и обратной схем замещения, моделирующая электромагнитный четырехполюсник, который является элементом любого электромагнитного аппарата.

На рис. 6 показан пример прямой и обратной схем замещения произвольного электромагнитного аппарата.

Физическая осуществимость рассматриваемых схем. Для физического осуществления схемы необходимы два условия: 1) возможность построения схемы требуемой конфигурации; 2) возможность осуществления элементов, удовлетворяющих соотношениям моделирования.

Для прямой схемы замещения первое условие сводится к условию обратимости конфигурации магнитной цепи аппарата, поскольку электрическая часть аппарата моделируется схемой тождественной конфигурации.

Практически аппараты с необратимой конфигурацией магнитной цепи, для которых было бы невозможным построение прямой схемы замещения, встречаются крайне редко.

Второе условие также легко выполняется для прямой схемы замещения. Комплексное магнитное сопротивление имеет мнимую часть, связанную, как известно, с потерями энергии на гистерезис и вихревые токи. Вещественная и мнимая части комплексного магнитного сопротивления всегда положительны, поскольку при наличии потерь магнитное напряжение опережает по фазе магнитный поток на некоторый угол, меньший $\frac{\pi}{2}$.

Такое магнитное сопротивление в соответствии с (27) будет моделироваться в прямой схеме замещения электрическим сопротивлением индуктивного характера с положительной вещественной частью. Осуществление подобного сопротивления всегда возможно.

Элементы электрической цепи аппарата моделируются в прямой схеме замещения теми же элементами, измененными лишь по величине в соответствии с выбранным масштабом.

В обратной схеме замещения, как нетрудно видеть, моделирование электрической части аппарата возможно лишь при условии обратимости конфигурации его электрической схемы; это условие является очевидным и в большинстве практических случаев выполняется. Кроме того, как следует из соотношения (47), емкости аппарата должны в обратной схеме замещения моделироваться отрицательными активными сопротивлениями. Поэтому наличие емкостей в электрической схеме аппарата не позволяет составить его обратную схему замещения из обычных пассивных элементов.

Магнитная цепь аппарата, как легко видеть, в обратной схеме замещения всегда может быть моделирована.

В некоторых случаях схема замещения аппарата должна моделировать его в определенном диапазоне частот, т. е. соотношения моделирования должны выполняться не только для постоянной, но и для переменной частоты. Этому требованию всегда удовлетворяет та часть прямой схемы замещения, которая моделирует электрическую часть аппарата. При моделировании магнитной части аппарата для переменной частоты возникает трудность, связанная с учетом гистерезиса [1].

Учет гистерезиса тесно связан с учетом нелинейности магнитной цепи, и он лучше всего может быть произведен в описываемых ниже схемах.

Схемы замещения для нелинейных электромагнитных аппаратов. Полное моделирование нелинейного аппарата означает воспроизведение в схеме замещения всех его характеристик, а также формы кривых изменения мгновенных значений токов, напряжений, магнитных потоков в любой ветви и в любом режиме.

Нелинейность в электромагнитных аппаратах создается прежде всего наличием ферромагнитных сердечников. Рассмотрим возможность учета нелинейности в прямой схеме замещения.

[1] Наличие вихревых токов легко учитывается включением в прямую схему замещения постоянного активного сопротивления, а в обратную схему замещения — постоянной индуктивности.

Для мгновенных значений величин уравнения (7) и (8) примут вид:

$$u_o = w \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \tag{54}$$

$$u_{mo} = -w \cdot i_o. \tag{55}$$

Вместо соотношений (22) и (23) получим:

$$u^{**} = m_\Phi \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \tag{56}$$

$$i^{**} = m_{U_m} \cdot u_m. \tag{57}$$

В соотношениях (54)... (57) буквы u, i, u_m, φ обозначают мгновенные значения соответственно напряжения, тока, магнитного напряжения и магнитного потока. Смысл индексов — прежний.

m_Φ и m_{U_m} — масштабы моделирования, определяемые из (24) и (25).

Для ветви электрической схемы, моделирующей некоторую магнитную ветвь аппарата, получим из (56) и (57) с учетом (28):

$$u^{**} = m_{Y_m} \frac{d\varphi}{du_m} \cdot \frac{di^{**}}{dt}. \tag{58}$$

Выражение (58) показывает, что в эту ветвь схемы замещения должна быть включена индуктивность, дифференциальная величина которой равна:

$$L^{**} = m_{Y_m} \cdot \frac{d\varphi}{du_m}. \tag{59}$$

В случае нелинейного аппарата эта индуктивность также должна быть нелинейной. Нетрудно показать, что магнитная характеристика сердечника этой индуктивной катушки должна быть подобна магнитной характеристике моделируемой ветви. Действительно, выражая индуктивность L^{**} через ее магнитный поток φ^{**}, число витков w^{**} и магнитное напряжение u_m^{**}, получим:

$$L^{**} = (w^{**})^2 \cdot \frac{d\varphi^{**}}{du_m^{**}}. \tag{60}$$

Считая магнитную индукцию одинаковой в пределах данной ветви магнитной цепи аппарата и в пределах магнитопровода соответствующей катушки схемы модели, можем выразить магнитный поток через магнитную индукцию B и сечение магнитопровода S, а магнитное напряжение — через напряженность магнитного поля H и длину средней силовой линии l. Тогда из (59) и (60) получим:

$$\frac{dB^{**}}{dH^{**}} = \frac{m_{Y_m}}{(w^{**})^2} \cdot \frac{S}{l} \cdot \frac{l^{**}}{S^{**}} \cdot \frac{dB}{dH}, \tag{61}$$

где величины, отмеченные двумя звездочками, относятся к индуктивной катушке схемы замещения, а величины без звездочки — к соответствующей ветви моделируемого аппарата.

С другой стороны,

$$H^{**} = \frac{i^{**} \cdot w^{**}}{l^{**}} = m_{U_m} \cdot w^{**} \cdot \frac{l}{l^{**}} \cdot H. \tag{62}$$

Система уравнений (61) и (62) дает необходимую связь между магнитными характеристиками материалов магнитопровода аппарата и индуктивной катушки моделирующей схемы.

Наиболее естественный путь практического выполнения схемы, удовлетворяющей этим уравнениям, — это изготовление катушки схемы модели из того же материала, из которого изготовлена соответствующая ветвь магнитопровода. Построенная таким образом схема замещения будет наиболее точно воспроизводить все электромагнитные процессы аппарата. При этом, очевидно, подобие магнитных характеристик будет достигнуто при условии

$$H = H^{**}, \tag{63}$$

$$B = B^{**}. \tag{64}$$

Тогда из (61), (62), (63), (64) с учетом (28) получим два соотношения:

$$m_{U_m} \cdot w^{**} = m_l, \tag{65}$$

$$m_\Phi = m_S \cdot w^{**}, \tag{66}$$

где

$$m_l = \frac{l^{**}}{l}, \tag{67}$$

$$m_S = \frac{S^{**}}{S}. \tag{68}$$

Соотношения (65) и (66) накладывают два условия на пять величин, что дает возможность три из этих величин (две из одного уравнения и одну — из другого) выбирать произвольно или из конструктивных соображений, разумеется учитывая при этом также уравнения (24) и (25).

Такая схема замещения может быть выполнена на расчетном столе переменного тока, если предусмотреть в нем катушки со сменным сердечником.

Проведение исследований на подобной схеме представляет большие удобства по сравнению с исследованием на уменьшенной опытной модели самого аппарата, поскольку схема замещения, где отдельные части магнитной цепи не связаны механически, позволяет легко изменять ее конфигурацию и величины отдельных элементов, что в модели аппарата достигается с несравненно бо́льшими трудностями, требуя часто полной ее переделки.

Если расчет ведется в первом приближении и не требуется особой точности, моделирование нелинейного аппарата можно еще более упростить, воспользовавшись тем известным фактом, что кривые намагничивания различных материалов, построенные в относительных единицах, при надлежащем выборе этих единиц весьма мало отличаются одна от другой.

Так, на рис. 7 изображены кривые намагничивания трансформаторной и динамной стали, построенные в относительных единицах:

$$\frac{B}{B_k} = F\left(\frac{H}{H_k}\right), \tag{69}$$

где B_k и H_k — постоянные, зависящие от материала.

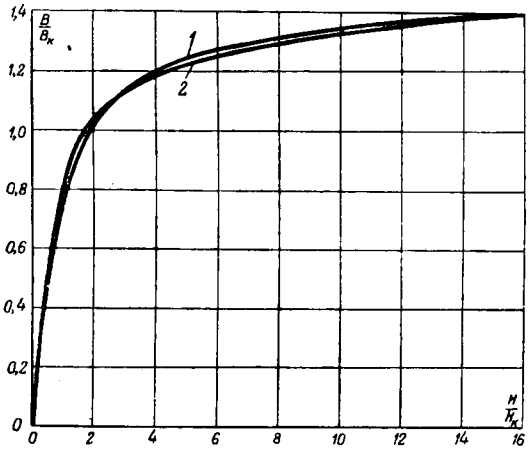


Рис. 7. Сравнение кривых намагничивания в относительных единицах. $B_{k1}=1$ *вб/м*²; $B_{k2}=1{,}235$ *вб/м*²; $H_{k1}=100$ *а/м*; $H_{k2}=594$ *а/м*.
1 — трансформаторная; *2* — динамная сталь.

Если сердечник катушки схемы замещения и соответствующая ветвь магнитопровода схемы замещения изготовлены из различного материала, всегда можно подобрать такие масштабы m_B и m_H, чтобы имело место приблизительное равенство

$$B^{**}(H^{**}) \approx m_B \cdot B(m_H \cdot H), \qquad (70)$$

где $B^{**}(H^{**})$ и $B(H)$ — магнитные характеристики материала магнитопровода катушки схемы замещения и соответствующей ветви магнитопровода аппарата.

Подобие магнитных характеристик будет в данном случае достигнуто при условии

$$B^{**} = m_B \cdot B, \qquad (71)$$

$$H^{**} = m_H \cdot H. \qquad (72)$$

Подставляя (71) и (72) в (61) и (62) и учитывая (28), получим вместо (65) и (66) следующие соотношения:

$$m_{U_m} \cdot w^{**} = m_H \cdot m_l, \qquad (73)$$

$$m_\Phi = m_B \cdot m_S \cdot w^{**}. \qquad (74)$$

Эти соотношения позволяют выбрать необходимые масштабы моделирования.

Для удобства практического осуществления таких схем замещения расчетный стол переменного тока целесообразно снабдить декадами нелинейных индуктивностей с ферромагнитным сердечником из наиболее употребительного материала (например, трансформаторной стали).

Индуктивности каждой такой декады должны иметь сердечники из одного и того же материала и должны быть подобраны так, чтобы напряженность магнитного поля во всех катушках была одинаковой, а потокосцепление находилось в заданных (например, десятичных) соотношениях. Равенство магнитных напряженностей в последовательно соединенных катушках декады будет достигнуто при условии соблюдения для всей декады очевидного условия:

$$\frac{w^{**}}{l^{**}} = пост. \qquad (75)$$

Если снабдить расчетный стол двумя видами таких декад, например, с сердечниками из трансформаторной стали и пермаллоя, на таком столе можно, используя приведенные выше соотношения, моделировать с достаточной точностью аппараты с сердечниками из любого магнитного материала, прибегая к применению катушек с сердечниками из материала аппарата лишь при особо тонких исследованиях.

Учет в прямой схеме замещения нелинейных элементов электрической цепи аппарата еще более прост и лучше всего достигается включением в эту схему тех же самых нелинейных элементов, которые включены в схему моделируемого аппарата, но другой величины (в соответствии с масштабами моделирования).

Выводы. 1. Для электромагнитных аппаратов возможно построение двух видов схем замещения, в которых элементы электрической цепи моделируют элементы электрической и магнитной цепей данного аппарата, а трансформаторы моделируют обмотки аппарата.

2. Наиболее удобной является прямая схема замещения, электрические характеристики которой подобны характеристикам аппарата. Такая схема замещения может быть построена для большинства аппаратов.

3. Прямая схема замещения может легко быть использована для моделирования нелинейных электромагнитных аппаратов.

Литература

1. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах, ч. 2, ОНТИ, 1936.
2. В. И. Коваленков. Основы теории магнитных цепей. Изд. Академии наук СССР, 1940.
3. Л. Д. Кудрявцев. О некоторых математических вопросах теории электрических цепей. Успехи математических наук, т. III, вып. 4/26, июль—август 1948.
4. А. С. Розенкранц. Исследование некоторых типов индукционных регуляторов с подмагничиванием. Диссертация (ИЭИ, 1948), гл. V, § 3 и 4.

[9. 11. 1951]

◇ ◇ ◇

Из опыта работы

Схема включения электромагнитного реле времени, обеспечивающая зависимую от тока выдержку времени

Кандидат техн. наук А. И. ТАНАТАР

Днепропетровский инженерно-строительный институт

Предлагается схема автоматического пуска асинхронных двигателей с зависимой от тока нагрузки двигателя выдержкой времени. В схеме используются стандартные отечественные электромагнитные реле управления.

Наиболее распространенными способами автоматического управления процессом пуска электродвигателей являются схемы пуска в функции времени и тока. Для приводов, работающих с переменной нагрузкой, эти способы автоматизации имеют существенные недостатки. Так, при пуске по времени время разгона двигателя при всех нагрузках остается постоянным, что приводит к недоиспользованию двигателя при малых нагрузках и слишком большим броскам тока при перегрузках.

При пуске по току при малых нагрузках ускорение системы может оказаться недопустимо большим, а при больших — слишком малым, что приведет к снижению производительности рабочей машины. Кроме того, при пуске по току при перегрузках двигателя возможна длительная работа на промежуточной ступени пускового реостата и он может перегореть.

Наиболее целесообразен пуск двигателей по принципу зависимой от тока выдержки времени. Однако существующие реле времени с зависимой от тока выдержкой времени (например, реле Райта) конструктивно сложны, мало надежны и поэтому не получили распространения.

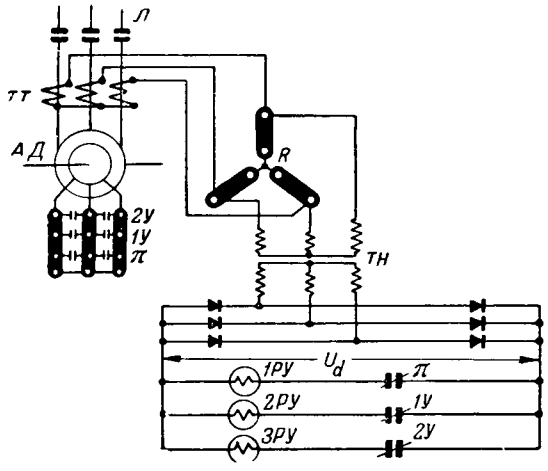


Рис. 1.

Предлагаемая схема включения стандартных электромагнитных реле времени типа РЭ-100 или РЭ-180 (рис. 1) обеспечивает автоматическое изменение выдержки времени реле в зависимости от тока в статорной цепи асинхронного двигателя.

В статорную цепь асинхронного двигателя *АД* с фазным ротором включены три однофазных трансформатора тока *ТТ* типа ТКФ, соединенных в звезду, и включенные на звезду сопротивления *R*. К концам этих сопротивлений подключен повышающий трансформатор напряжения *ТН*, от вторичной обмотки которого при помощи трехфазной мостовой схемы из селеновых или меднозакисных вентилей питаются катушки электромагнитных реле времени (с успокоителем) *1РУ*, *2РУ*, *3РУ* и т. д.

При увеличении нагрузки на валу двигателя ток во вторичной обмотке трансформатора тока *ТТ* возрастает и увеличивается падение напряжения на сопротивлениях *R*. Вследствие этого повышается напряжение на первичной и вторичной обмотках трансформатора напряжения *ТН* и возрастает выпрямленное напряжение U_d, питающее катушки реле времени. При уменьшении нагрузки на валу двигателя напряжения U_d убывает. У реле типов РЭ-100 и РЭ-180 с успокоителем магнитная система не насыщена; поэтому при понижении напряжения их питания пропорционально изменяется выдержка времени. При напряжении в 50% от номинального выдержка времени составляет примерно половину того значения, которое соответствует номинальному напряжению.

Зависимость между выдержкой времени t реле времени и магнитным потоком $\Phi_{макс}$, определяемым величиной приложенного напряжения, выражается уравнением

$$t = T \ln \frac{\Phi_{макс}}{\Phi_{мин}}, \qquad (1)$$

где $T = \frac{L}{r}$ — электромагнитная постоянная времени катушки;

$\Phi_{макс}$ — предельное значение потока в системе в момент размыкания катушки (рис. 2);

$\Phi_{мин}$ — минимальное значение потока, при котором отпадает якорь реле.

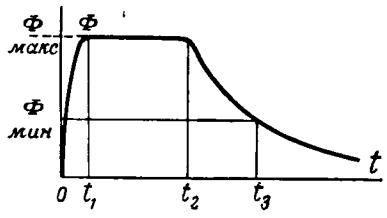


Рис. 2.

$\Phi_{макс}$ зависит от напряжения на катушке реле и величины конечного зазора. $\Phi_{мин}$ определяет минимальное электромагнитное усилие, при котором якорь реле еще удерживается в притянутом положении и зависит от степени натяжения пружины, создающей отрывное усилие на якоре.

При неизменной настройке реле изменение выпрямленного напряжения U_d сказывается только на величине потока $\Phi_{макс}$, в связи с чем меняется выдержка времени реле согласно (1).

Практически с изменением нагрузки на валу двигателя выпрямленное напряжение U_d может изменяться примерно в 2,0...2,5 раза.

Подбор параметров схемы следует производить так, чтобы напряжение на катушках реле при холостом ходе двигателя было больше того напряжения U_d, при котором происходит притягивание якоря реле (обычно составляющего 30% номинального). Установка выдержки времени реле происходит при номинальной нагрузке двигателя *АД* привода.

Предложенная схема отличается той особенностью, что до тех пор, пока двигатель не включен, напряжение на катушках реле времени $U_d = 0$.

Для получения стабильной выдержки времени нужно, чтобы к моменту отключения катушки реле магнитный поток в системе достиг значения $\Phi_{макс}$, определяемого величиной приложенного напряжения. Для этого необходимо, чтобы между моментом включения асинхронного двигателя в сеть и моментом отключения катушки первого реле времени прошло время, большее времени подготовки реле t_1 (рис. 2) и составляющее для реле типа РЭ-100 около 0,8 *сек*, а для реле типа РЭ-180 — 1,5...2,5 *сек*.

Это может быть достигнуто различными способами, из которых следует выбрать наиболее целесообразный для данного типа привода. Например, для асинхронного привода шахтной подъемной установки, имеющего обычно, кроме рабочих, еще две предварительные ступени сопротивлений, служащие для натяжения каната с относительно небольшим усилием и не автоматизируемые, подача напряжения на катушки электромагнитных реле времени осуществляется при включении асинхронного двигателя, а выключение первого реле времени *1РУ* осуществляется при срабатывании контактора *П* (рис. 1), управляющего предварительной ступенью реостата (рис. 1). Промежуток времени между включением линейного контактора *Л* и контактора *П* должен превышать время подготовки реле t_1.

Для асинхронных двигателей относительно небольшой мощности, пускаемых посредством реостатов с небольшим числом ступеней (до 5), в случае применения реле времени типа РЭ-100 предложенная схема (рис. 1) может быть применена в однофазном исполнении.

Рассмотренная схема включения реле времени не вызывает существенного удорожания установки и может быть применена в приводах переменного тока, работающих с переменной нагрузкой.

[2. 12. 1952]

◇ ◇ ◇

Из истории электротехники

М. О. Доливо-Добровольский — изобретатель искрогасительной решетки

Под таким названием в 1949 г в журнале «Электричество» (№ 9, 1949, стр. 71—73) была опубликована статья О. Б. Брона; в которой доказано, что М. О. Доливо-Добровольский первый в мире предложил принцип гашения дуги в искрогасительной решетке и что американский инженер Слепян, спустя 16 лет после М. О. Доливо-Добровольского лишь повторил предложение последнего.

Некоторое время тому назад О. Б. Брону удалось получить фотокопии германских патентов М. О. Доливо-Добровольского № 266745 и 272742 от 4 мая и от 24 июля 1912 г. Переведенный на русский язык текст этих патентов воспроизводится ниже в качестве документального доказательства приоритета выдающегося русского электротехника Михаила Осиповича Доливо-Добровольского.

Патенты М. О. Доливо-Добровольского свидетельствуют не только о большой изобретательности, но и о чрезвычайной технической прозорливости их автора. Опережая техническую мысль зарубежных стран, М. О. Доливо-Добровольский правильно поставил ряд основных вопросов дугогашения, сохраняющих свое актуальное значение и в настоящее время. До изобретения дугогасительной решетки все способы гашения дуги были основаны на использовании явлений, происходящих в положительном столбе дуги. Доливо-Добровольский впервые открыл возможность использования для этой цели явлений, происходящих у опорных точек дуги. Это принципиально новое решение оказалось весьма плодотворным и нашло широкое применение.

М. О. Доливо-Добровольский не ограничился изложением принципа нового метода дугогашения, он разработал ряд конструкций, позволяющих применить новый принцип в различных аппаратах

Мысли М. О. Доливо-Добровольского, изложенные в его патентах, представляют не только исторический, но и практический интерес для наших инженеров.

Выдано 1 ноября 1913 года

ПАТЕНТНОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО № 266745

Класс 21-с группа 35

Устройство для ограничения размеров электрической дуги, возникающей при отключении цепей с током.

Запатентовано в Германии с 4 мая 1912 года.

Для того чтобы погасить электрическую дугу, которая возникает при отключении цепей постоянного тока, необходимо растянуть ее до определенной длины. Эта длина зависит от электродвижущей силы и сопротивления цепи.

Электрические аппараты, как, например, выключатели, предохранители и т. д. нужно рассчитывать таким образом, чтобы они надежно гасили очень длинные дуги, возникающие при отключении токов короткого замыкания. Если дать возможность дуге свободно растягиваться по рогообразным электродам, то при высоких напряжениях она достигает чрезвычайно больших размеров. Например, если напряжение постоянного тока повышается до 1 000 вольт, то при токе в несколько сот ампер дуга поднимается на высоту около одного метра над концами рогов.

Размеры дуги в настоящее время уменьшаются путем применения, например, магнитного дутья; точно так же для того, чтобы ограничить выброс дуги над камерой аппарата, встраивают в камеру поперечные изоляционные перегородки. Около краев этих перегородок дуга растягивается и приобретает волнообразную форму.

Предлагаемое изобретение состоит в том, что на пути дуги ставится большое количество закрепленных поперечных перегородок из проводящего материала с большой теплоемкостью, например, из металла или материала с металлическим покрытием. Электрическая дуга при своем движении принудительно разрезается на части краями этих перегородок. На поверхности металлических перегородок имеет место сильный теплоотвод. При этом дуга гаснет при относительно небольшом увеличении ее длины.

Количество поперечных перегородок нужно выбирать различным в зависимости от напряжения и рода тока. Известно, что при напряжении ниже 15 до 20 вольт постоянного тока вообще дуга не возникает. Точно так же она не возникает при напряжении ниже 300 вольт переменного тока. Если подобрать число теплопроводящих стенок таким образом, что дуга будет ими разбиваться на ряд коротких дуг с напряжением, близким к указанному выше, то вместо дуги появляются только небольшие искры. В таком случае легко полностью избежать появления пламени дуги за пределами камеры. Пусть, например, требуется погасить дугу с напряжением 6 000 вольт переменного тока. В таком случае, в соответствии со сделанным нами изобретением, можно ограничиться числом теплопроводящих перегородок от 10 до 20. Это можно сделать потому, что при напряжении от 600 до 300 вольт одиночная дуга хорошо гаснет, будучи сильно охлаждаема поперечными перегородками.

Предлагаемое изобретение можно с успехом применять для гашения дуги в роговом громоотводе, в рубильниках, в предохранителях и в других аппаратах.

На рис. 1 показан обыкновенный выключатель с рогами. Между рогами помещено, в соответствии с описываемым изобретением, большое количество поперечных перегородок (*1*) из металла.

Учитывая большое количество поперечных перегородок и вызванное этим затрудненное движение дуги, приходится применять искусственные методы для того, чтобы ускорить движение дуги, например, магнитное дутье (*2*). Для увеличения скорости гашения дуги в каждой отдельно взятой

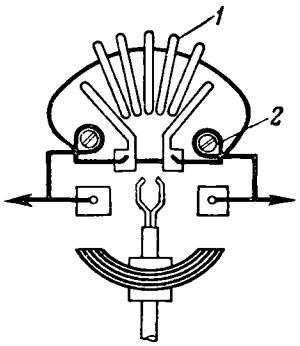


Рис. 1.

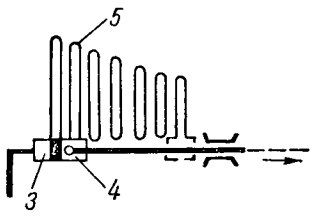


Рис. 2.

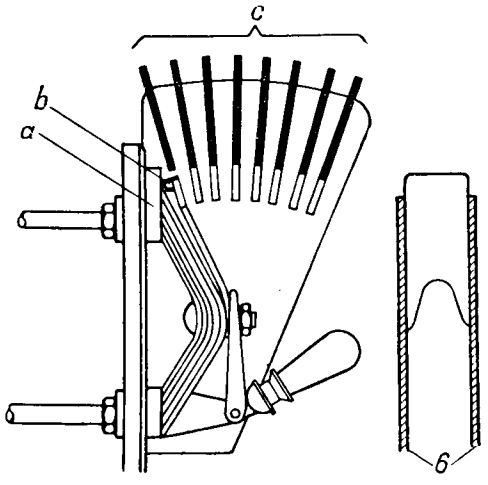


Рис. 3.

щели поперечные перегородки поставлены так, что расстояние между ними кверху увеличивается. На рис. 2 приведено в качестве примера другое устройство. Пусть разрыв тока в цепи наступает благодаря расхождению электродов *3* и *4*. Пусть электрод *4* движется по направлению стрелки. При этом возникает электрическая дуга, которая проникает в область, занятую металлическими или металлизированными пластинками *5*. Здесь также целесообразно применить искусственный способ для увеличения усилий, вгоняющих дугу, например, постоянный магнит или вентилятор. Так как при движении расходящихся контактов у первых перегородок имеют место значительные скачки напряжений, то эти первые пластины должны обладать очень высокой теплопроводимостью. В связи с этим необходимо первые перегородки делать несколько выше последующих.

На рис. 3 показано дальнейшее применение изобретения. Оно относится к рычажному выключателю. Сказанное выше об устройстве рис. 2 в основном относится и к рассматриваемому случаю. Если применяются, например, пластины (устройство рис. 3), заключенные между изоляционными щеками *6*, то целесообразно дугу удерживать в середине пластины. Это достигается тем, что, согласно патенту № 256517, в нижней части пластины делается выемка или вырез.

ПАТЕНТНАЯ ФОРМУЛА

1. Устройство для уменьшения размеров электрической дуги, возникающей при отключении цепей тока, отличающееся тем, что дуга, образующаяся между расходящимися электродами, входит в пространство, занятое неподвижно стоящими поперечными перегородками. Число этих перегородок выбирается таким, что дуга разбивается на короткие участки, напряжение на которых меньше минимального напряжения, необходимого для ее поддержания.

2. При исполнении по предложению 1, устройство, отличающееся тем, что расстояния между неподвижно стоящими перегородками увеличивается в направлении движения дуги. Это сделано с целью получения более быстрого гашения дуги при одновременном ее охлаждении.

3. При исполнении по предложениям 1 и 2 для аппаратов, в которых дуга возникает между растягиваемыми электродами, устройство, отличающееся тем, что дуга сначала попадает на длинные пластины, далее пластины делаются более короткими.

Выдано 8 апреля 1914 г.

ПАТЕНТНОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО № 272742

Класс 21-с группа 35

Устройство для ограничения размеров электрической дуги, возникающей при отключении цепей с током

Дополнение к патенту № 266745

Запатентовано в Германии с 24 июля 1912 г.

В патентном свидетельстве № 266745 описано устройство для ограничения размеров электрической дуги на таких аппаратах, как выключатели, предохранители и т. д. Это устройство состоит из большого количества поперечных рядом расположенных пластин, помещенных на пути электрической дуги. Пластины обладают высокой теплопроводностью и делаются, например, металлическими или с металлическою внешнею поверхностью. Цель применения этого устройства состоит в том, чтобы принудительно разбить движущуюся дугу на ряд отдельных дуг. Это делается для того, чтобы уменьшить или совсем предотвратить появление пламени вне выключателя.

В основном патентном свидетельстве указано, что для фиксирования положения искрового разряда металлические пластины должны быть предусмотрены с вырезами. Опыты, предпринятые после этого, показали, что вырезы и выемки действительно создают определенную фиксацию положения дуги. Однако в большом количестве случаев, особенно при повышенных напряжениях, этого фиксирования оказывается недостаточно.

В связи с этим представлялось желательным разработать такую конструкцию, которая осуществляла бы безусловно надежное фиксирование положения электрической дуги и предотвращало бы отклонение последней в сторону. Предметом изобретения является такая именно конструкция. Она изображена на рис. 4 и 5. На этих рисунках изображен выключатель, в котором разрыв цепи тока происходит благодаря расхождению контактов *3* и *4*. При этом контакт *4* движется, например, в направлении, указанном стрелкою (*I*).

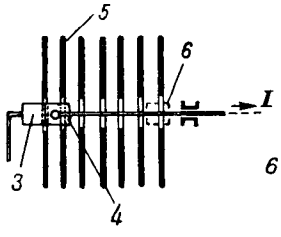


Рис. 4.

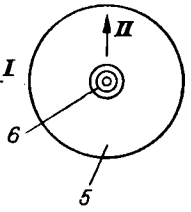


Рис. 5.

Вместо металлических пластин, которые согласно основному патенту располагаются над электрической дугой, здесь применены металлические шайбы *5*, которые со всех сторон окружают дугу, возникающую между контактами *3* и *4*. Металлические шайбы могут быть, например, круглыми с отверстием (*6*) посередине.

Электрическая дуга под действием магнитного поля или струи сжатого воздуха, направленной по стрелке (*II*), вгоняется в область, занятую шайбами *5*, где и разбивается на ряд отдельных дуг.

ПАТЕНТНАЯ ФОРМУЛА

Устройство для ограничения размеров электрической дуги, возникающей при отключении цепи тока, согласно патенту 266745 отличающееся тем, что расположенные рядом поперечные металлические перегородки (*5*) обладают большой теплопроводностью и имеют такую форму, при которой дуга, возникающая между электродами *3* и *4*, оказывается окруженной ими со всех сторон. При этом невозможно отклонение дуги, движущейся под действием магнитного поля или струи воздуха, в сторону от плаотин (*5*).

В приведенных патентах Михаил Осипович Доливо-Добровольский изложил основные принципы своего изобретения, получившие за истекшие 40 лет широкое распространение и применение в различных областях техники.

Доктор техн. наук, проф. О. Б. БРОН

Ленинград

◇ ◇ ◇

Заметки и письма

О термине „Реактивный двигатель"

Явнополюсный синхронный двигатель без обмотки возбуждения принято у нас называть реактивным двигателем. Термин этот неудачен не только потому, что появились реактивные двигатели в авиации, но главным образом потому, что он вызывает у начинающих изучение курса электрических машин представление о чем-то реактивном, не активном, в то время как двигатель развивает активный, полезный момент

$$M = \frac{X_d - X_q}{2X_d \cdot X_q} \sin 2\vartheta$$

благодаря разности его параметров (реактивностей) X_d и X_q по продольной и поперечной осям.

Автор предлагал изменить этот термин.

Возможны следующие названия этого двигателя: 1) реактансный двигатель; 2) параметрический двигатель; 3) синхронный двигатель без обмотки возбуждения.

Возможно, кто-нибудь предложит более удачный термин в отклике на нашу заметку.

Профессор А. Я. БЕРГЕР

Проф. А. Я. Бергер правильно ставит вопрос о замене термина „синхронная реактивная машина" другим, лучше передающим особенности этой машины. Новые термины, предложенные проф. А. Я. Бергером, нельзя признать удачными. Редакция просит читателей высказаться по данному вопросу.

РЕДАКЦИЯ

◇ ◇ ◇

Письмо в редакцию

УВАЖАЕМЫЙ РЕДАКТОР!

Просим сообщить через журнал читателям нашей книги „Переходные процессы в электрических системах", изданной Госэнергоиздатом, о необходимости внесения в нее следующих поправок:

1. На рис. 2-2, 2-3, 2-4 и 2-5 угол обозначенный через γ, в действительности является углом γ_1, дополняющим γ до 90°, причем $\gamma = 90° - \gamma_1$, т. е. угол γ отсчитывается от оси витка—линии, перпендикулярной плоскости витка;

2. В выражении $G(p)$ (2-82) пропущен сомножитель $\frac{X_{afd}}{R_{fd}}$.

В. А. ВЕНИКОВ и Л. А. ЖУКОВ

Дискуссии

К статье Б. Г. Лорткипанидзе „О правилах защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами“

(Электричество № 9, 1952)

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ

Москва

Вопрос о пересмотре «Правил защиты» поднят в статье Б. Г. Лорткипанидзе вполне своевременно.

Как по самим Правилам, так и по статье Б. Г. Лорткипанидзе можно сделать следующие замечания:

1. Для Правил одним из главнейших вопросов является установление мероприятий, ведущих к снижению блуждающих токов. Поэтому большое значение имеет § 4 Правил о проведении защитных мероприятий, перечисляемых в этом параграфе, являющихся основной задачей для организаций, проектирующих и эксплуатирующих электротяговые установки.

В редакции, предлагаемой Б. Г. Лорткипанидзе, § 4 дополнен требованием уменьшения «длины рельсовых участков между точками отсоса за счет увеличения числа этих точек», совершенно справедливо поставленным на первое место. Необходимо лишь подчеркнуть, что для электрифицированных железных дорог это требование может быть удовлетворено только за счет уменьшения расстояния между подстанциями и увеличения их числа. Поэтому для ограничения блуждающих токов на наших железных дорогах большое значение имеет применение системы «распределенных» тяговых подстанций, пока еще не получившей распространения, хотя она и предложена достаточно давно.

2. Вполне правильно поднимается вопрос об изъятии нормы на сопротивление одного стыка и замены ее нормой среднего сопротивления стыков на участке определенной длины (1 *км*) с ограничением максимального сопротивления стыка. Однако нельзя согласиться с предлагаемой величиной среднего сопротивления, равного сопротивлению 2,5 *м* рельса, так как принятие этой величины означало бы снижение общей проводимости стыков по сравнению с устанавливаемой § 24 действующих Правил. Действительно, при выполнении требований § 24 среднее сопротивление стыка на 1 *км* будет меньше, так как из 160 стыков, имеющихся на 1 *км*, некоторое количество будет иметь сопротивление, меньшее, чем сопротивление 2,5 *м* рельса, и не будет ни одного стыка, имеющего большее сопротивление.

Исходя из этих соображений, норму на один стык целесообразно принять порядка сопротивления 2 *м* рельса или немного более при максимальном сопротивлении стыка порядка сопротивления 6 ... 8 *м* рельса.

Переработанный § 24 следует дополнить разъяснением того, что понимается под сопротивлением стыка в метрах рельса, как это предлагает Б. Г. Лорткипанидзе. Это небольшое дополнение устранит всякие кривотолки в оценке сопротивлений стыков и соответствия сопротивления норме.

3. В § 39 действующих Правил надо указать, что 20-процентное увеличение сопротивления относится к участкам, на которых уложены рельсы длиной 12,5 *м*, и что для участков, имеющих рельсы длиной 25 *м*, увеличение сопротивления при расчетах следует принимать равным 10%. Цифры 20 и 10, кроме того, надо уменьшить в соответствии с устанавливаемой нормой среднего сопротивления стыка.

4. Предложения Б. Г. Лорткипанидзе о довольно существенном изменении требований § 51 не являются обоснованными. Практика электрических железных дорог давно пришла к использованию рельсов как заземлителя. Металлические опоры контактной сети наглухо присоединяются к рельсам. Конечно, при этом увеличивается утечка токов в грунт. Но опыт эксплуатации показывает, что в средних условиях сопротивление растеканию фундаментов опор достаточно велико, и получающуюся утечку можно допустить. Других возражений против присоединения опор на бетонных и железобетонных фундаментах к рельсам в средних условиях не имеется. В условиях большей проводимости растекания, которую могут иметь фундаменты, начинают страдать устройства сигнализации, централизации и блокировки; для правильной работы последних рельсовые цепи должны обладать определенным минимальным сопротивлением утечки. В местах большой утечки рельсы необходимо изолировать от фундаментов, что в настоящее время достигается включением в провод, соединяющий опору с рельсом, искрового промежутка. Практика применения искровых промежутков постепенно расширяется.

Безопасность людей при включении в заземляющий провод искрового промежутка вследствие малого времени срабатывания последнего обеспечивается в достаточной мере.

Включение искровых промежутков при использовании рельсов как заземлителя обеспечивает выполнение требований § 4 *в* Правил, поэтому их применение, возможно, следовало бы сделать обязательным. Однако затраты, связанные с установкой искровых промежутков, а также некоторые другие соображения (запрещение установки искровых промежутков в заземлениях приводов разъединителей и т. п.) не позволяют в настоящее время обязывать железные дороги устанавливать искровые промежутки во всех случаях.

Устройство индивидуальных заземлений, которые для обеспечения защиты от токов короткого замыкания должны иметь малое сопротивление, обходится очень дорого, требует большой затраты рабочей силы и материалов и поэтому при наличии такого прекрасного заземлителя, каким является рельсовый путь, нецелесообразно.

На основании приведенных соображений § 51 следует изложить в такой редакции:

«На металлических и железобетонных мостах рельсы не должны иметь металлического контакта с фермами или арматурой железобетона. Фермы таких мостов должны быть присоединены к рельсам пути через искровые промежутки».

Следующий абзац § 51 удобнее выделить в отдельный параграф, поскольку он предъявляет требования лишь к конструкциям заземляющих проводов; при этом подразумевается, что металлические опоры и прочие сооружения в обязательном порядке, установленном другими нормами, заземлены на рельс.

Окончание § 51, выделяемое в отдельный параграф, можно изложить так:

«...Присоединение металлических опор контактной сети, сигнальных мостиков, мачт светофоров и т. п. к путевым рельсам должно выполняться изолированным от земли проводом. Рекомендуется включать в эти провода искровые промежутки».

5. Все, что сказано выше относительно § 24, полностью распространяется и на § 52. Здесь можно предложить норму среднего (на 1 *км*) сопротивления стыка 2,5 ... 2,6 *м* и норму максимального сопротивления 6 ... 7 *м*.

6. В § 64 следует уточнить, что под минимальным расстоянием понимается расстояние по горизонтали.

7. В § 73 наряду с магистральными водопроводными трубами следует выделить также магистральные газопроводы.

8. В § 74 лучше указать: «...с помощью изолирующих покрытий по соответствующим нормам на эти сооружения».

9. Первый абзац § 81 следует изъять, так как «Электронные фильтры» для трубопроводов никакого распространения не получили.

10. В § 85 требование о водонепроницаемости изолирующих муфт и стыков надо исключить как совершенно очевидное.

11. § 86 действующих Правил изложен неудовлетворительно. В § 82 изолирующая канализация трактуется как самостоятельное защитное устройство наравне с изолирующими покрытиями, в параграфе же 86 канализация является одним из видов защитных покрытий. Следует внести больше четкости в формулировки этих параграфов.

12. В § 88 следует исключить вторую фразу: требования Правил должны быть категоричными.

13. Редакцию § 99, предлагаемую Б. Г. Лорткипанидзе, надо всемерно поддержать, как более точно отражающую практику дела и более обоснованную теоретически. Предлагаемое Б. Г. Лорткипанидзе дополнение § 99 нормой величины защитного потенциала следует выделить в отдельный параграф и поставить его после § 97.

14. Примечание к § 100 следует исключить, как не имеющее никакого отношения к вопросам защиты от блуждающих токов.

15. В последнем пункте статьи Б. Г. Лорткипанидзе предлагает дополнить Правила разделом, нормирующим устройства рельсовых путей и подземных сооружений на территориях, где блуждающие токи опасны как источник возможного искрения. Разработка и издание правил защиты нефтебаз и аналогичных им сооружений от образования искр вследствие разности потенциалов, могущей получиться из-за наличия блуждающих токов в подземных коммуникациях, весьма необходимы. Но такие правила должны быть изданы самостоятельно, так как они не связаны с защитой от электрокоррозии, и их соблюдение будет обязательно и при электрической тяге на переменном токе, на которую действующие Правила не распространяются.

16. Правила начинаются с раздела «Терминология». Такой раздел, вообще говоря, не обязателен для правил и норм. 14 лет назад — при составлении Правил — его включение оправдывалось. В настоящее время этот раздел можно исключить, так как литература по вопросам блуждающих токов пополнилась, появился стандарт на терминологию по коррозии и проект терминологии по электротяге.

17. Правила следует тщательно отредактировать, в частности исключить мотивировки и обоснования некоторых требований, как, например, «особенно важно соблюдать в отношении голых освинцованных кабелей,—такая формулировка наводит на мысль, что при других типах кабелей соблюдение требования этого пункта не является существенным, и т. д.

К проекту раздела правил „Проводки шинопроводами“

(Электричество № 7, 1952)

Инж. Б. С. ТАТКО

Проектом не учтены установки для электролиза и широко применяющиеся в некоторых отраслях машиностроения шинопроводы для многопостовой электросварки ($U_{ном} = 65$ *в*) и для канализации тока в гальванических цехах ($U_{ном} = 6 \ldots 12 \ldots 40$ *в*). Цеховые троллеи по существу своему также относятся к этому виду проводок.

В перспективе следует еще иметь в виду предложение М. В. Грейсуха о передаче энергии шинопроводами при напряжении 3 ... 10 *кв*[1].

С точки зрения систематичности построения Правил необходимо расширить предлагаемый раздел, включив в него категории шинопроводов, отмеченные выше, и исключив некоторые специфические шинопровода. При этом нужно учесть, что сварочные шинопроводы приходится прокладывать также и на открытом воздухе (открытые сборочно-сварочные стенды в производстве металлических конструкций, стенды и стапели на судостроительных заводах и т. п.).

По тексту проекта предлагаем следующие изменения:

Параграф 1 изложить в следующей редакции:

«Настоящие Правила относятся к электрическим сетям напряжением до 1 000 *в* внутри и вне производственных, общественных, культурно-бытовых и жилых зданий, выполняемым из лент или профильных проводников из цветного металла или стали, проложенным открыто либо в каналах».

В § 2 исключить слова «...а равно и других разделов Правил». При таких «ссылках» читатель, желающий получить конкретную справку по интересующему его вопросу, должен просмотреть ... почти весь сборник Правил. Необходимо в этом параграфе дать ссылки на точно определенные параграфы других разделов. Если это получается громоздким, то допустима как исключение ссылка на тот или иной конкретный раздел или главу, но не на всю книгу.

В конце первой главы указать, что настоящие Правила не распространяются на специальные виды шинопроводов: троллейные линии, электролизные — металлургические, электротермические и распределительные устройства.

Глава 2 «Определения» должна начинаться со следующего параграфа:

«Шинопроводом в настоящих Правилах называется шинная проводка, служащая для передачи или распределения электрической энергии, включая поддерживающие и ограждающие ее конструкции».

Далее должны быть указаны и разграничены определения открытой или закрытой прокладки шинопроводов. Здесь же должна быть приведена классификация шинопроводов по назначениям и напряжениям с учетом предлагаемого расширения рамок проекта. Примерная классификация может быть такой:

А. Шинопроводы различаются по назначениям:

а) *магистральный или распределительный* — для передачи и распределения электрической энергии при напряжениях электроприемников до 1 000 *в* в закрытых помещениях;

б) *сварочный* — для питания сварочных постов при напряжении до 65 *в*;

в) *низковольтный* — для распределения энергии в гальванических цехах при напряжениях до 40 *в*;

г) *специальные* (рассматриваемые в других разделах Правил).

Б. Шинопроводы различаются по способу защиты от прикосновения к токоведущим частям и от воздействия окружающей среды:

а) *голый* — с открытыми шинами, не защищенными от прикосновения или попадания на них посторонних тел;

б) *защищенный* — с шинами, огражденными от случайного прикосновения или попадания на них посторонних тел кожухом из сетки, перфорированной стали или дерева; сетка или перфорация имеют размеры ячеек не более 20 × × 20 *мм*;

в) *в кожухе или в коробе* — с шинами, монтированными в сплошном коробе из металла или дерева; швы или стыки отдельных граней короба допускают воздухообмен;

г) *пыленепроницаемый* — аналогичный указанному в п. «в», но в кожухе с уплотненными стыками, не допускающем свободного воздухообмена;

д) *закрытый* — проложенный в непроходном, закрывающемся канале; при снятой крышке доступен для прикосновения.

[1] М. В. Грейсух. Передача и распределение электроэнергии при помощи шин. Электричество № 5, 1952.

§ 15*а* должен быть уточнен определением участка или длины шинопровода, на котором измеряется сопротивление изоляции.

§ 24 нужно указать предельное удаление аппарата от главного или распределительного шинопровода, учитывая, что последние могут прокладываться в цехах на высоте до 15 ... 20 *м*, а аппараты должны быть доступны для управления с пола цеха.

Термин «шинопровод *малой* мощности» (§ 27) лишен физического смысла. Здесь уместно говорить только о сечении или пропускной способности.

Глава 5 (§ 32 ... 37) должна быть переработана с учетом применения напряжений 6 ... 12 и 40 ... 65 *в*. В § 50 исключить слова «опасность их повреждения краном мало вероятна» как неприемлемые в Правилах. Если шинопровод установлен в пролете под краном, то рассчитывать можно только на естественную защиту окружающими станками. Возможность повреждения крюком крана или подвешенным грузом всегда следует считать вероятной.

§ 51 и 52 изложить в иной редакции, обоснование которой ясно из сопоставления с текстом проекта:

§ 51. Голые шинопроводы, кроме сварочных, могут прокладываться ниже уровня крана, в его мертвой зоне, непосредственно под троллеями, при расстоянии между ближайшими проводами обеих проводок не менее 0,5 *м*.

§ 52. Голые шинопроводы всех назначений могут прокладываться:

а) на общей с троллеями подкрановой балке, но со стороны, обратной креплению троллей, если между балками и колоннами имеется просвет, защищенный сверху сплошным настилом;

б) ниже уровня крана по той стороне пролета, где нет троллеев.

§ 52а. Во всех случаях прокладки шинопроводов всех назначений по § 51 и 52 они должны быть недоступны для случайного прикосновения из кабины крана.

Рекомендуемое в § 26 и 47 обслуживание аппаратуры шинопроводов с лестниц можно допустить при высоте до 4 *м*. При высоте свыше 4 *м* по соображениям безопасности пользование лестницами следует исключить и требовать устройство постоянных огражденных площадок со стационарными трапами. Вход на них может быть разрешен с ходовых площадок крановых путей.

В проекте не затронуты вопросы, на которые следует дать указания в Правилах:

а) Применение дерева для изоляции при напряжении до 65 *в*.

б) Нормативы для оценки качества контактных соединений и основные методы испытания.

в) Указание о проверке температуры и об обеспечении вентиляции шинопроводов в кожухах и каналах.

г) Условия, при соблюдении которых разрешается в качестве обратного (заземленного) провода сварочной сети использовать металлические конструкции зданий, рельсы и т. п. при постоянном и переменном токе.

д) Необходимость обеспечения при проектировании стока воды и дренажа наружных каналов.

По страницам технических журналов

ЗАДАЧИ СВЕТОТЕХНИКИ В РЕКОНСТРУКЦИИ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ МОСКВЫ

Директивы XIX съезда Коммунистической партии Советского Союза по пятому пятилетнему плану развития СССР на 1951—1955 гг. требуют улучшения городского благоустройства. Техника наружного освещения в органическом сочетании с архитектурой города тесно связана с этим вопросом.

Под наружным освещением города понимается не только освещение проезжей части и тротуаров, но и световая сигнализация, рекламы, а также освещение фасадов, памятников, зелени.

В настоящее время проезжая часть дорог освещена недостаточно, а применяемые осветительные устройства, как, например, молочные шары и другие фигурные замкнутые арматуры из молочного стекла, малоэкономичны.

Качество освещения улиц также требует изменения. В поле зрения водителей транспорта и пешеходов находится слишком много различных огней, что ухудшает различение сигналов и препятствий. Необходимо разработать и проверить: 1) новые светотехнические принципы, приемы и нормы освещения проезжей части улиц и тротуаров; 2) правила и нормы устройства световых сигналов и световой рекламы; 3) новые источники света, светильники, прожекторы, светосигнальные приборы и светотехнические материалы.

Световая реклама в виде слишком ярких, безвкусных и нередко бессодержательных надписей и рисунков искажает архитектуру города. Следует разработать теоретические вопросы освещения столицы с архитектурной точки зрения и нормы освещения фасадов, зданий, витрин, зелени.

Наружное освещение Москвы представляется авторам в следующем виде. Освещение проезжей части улиц и тротуаров обеспечивает удобство и безопасность движения, но источники света, по возможности, скрыты от глаз и не воспринимаются как яркие слепящие пятна. Встречные препятствия благодаря умелому освещению дорог видны водителям настолько хорошо, что нет надобности в зажигании фар у автомашин. С домов сняты неоновые лампы и другие виды яркой неподвижной и мигающей световой рекламы. Фасады домов отдельно освещены мягким и спокойным светом скрытых источников. Подсвечены ряды уличных деревьев и скверы. Световая реклама, осуществленная на иных технических принципах, и витрины магазинов, освещенные скрытыми источниками света, подчинены той же общей идее создания вечерней архитектуры города. Они дополняют архитектуру и оживляют вечерний облик города.

Лишь совместная научно-исследовательская и инженерная работа светотехников, архитекторов, работников промышленности и коммунального хозяйства обеспечит надлежащее наружное освещение городов.

(Известия АН СССР, Отделение технических наук, № 11, 1952. Д. И. Лазарев и М. В. Соколов)

ОСВЕЩЕНИЕ ФАСАДОВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина разработал способы освещения фасадов высотных зданий г. Москвы. Реализуются проекты наружного освещения Московского государственного университета им. Ломоносова на Ленинских горах, здания Министерства путей сообщения у Красных ворот и административного здания на Смоленской площади. Составлены технические задания на новые типы источников света и осветительных приборов, разработана теория расчета требуемой для них оптики и проведены испытания опытных образцов приборов фасадного освещения.

Принято три вида освещения фасадов — праздничное архитектурное, иллюминационное и каждодневное архитектурное.

Праздничное архитектурное освещение устраивается прожекторами фасадного освещения (ПФС) и осветительными приборами с зеркальными лампами. Это освещение проектируется белым от ламп накаливания и лишь в отдельных случаях цветным без динамических световых эффектов.

Иллюминационное освещение чаще всего выполняется дополнительным оконтуриванием зданий светящимися линиями или гирляндами из электрических ламп, а также освещением праздничных украшений — призывов, портретов, знамен... Это освещение может быть цветным и динамическим. Оборудование иллюминационного освещения предусматривается съемным при постоянных пунктах питания электрической энергией и постоянных же конструкциях креплений.

Каждодневное архитектурное освещение из экономических соображений проектируется в основном лишь для входов и верхних венчающих элементов здания. Этот тип освещения является частью праздничного архитектурного освещения.

В статье показано преимущество лабораторной разработки различных вариантов освещения фасадов с помощью эскизов, выполненных светящимися красками, а также выбор яркостей, требуемых для различных участков освещаемых фасадов. Например, для обеспечения хорошей видимости верхних участков зданий с больших расстояний требуется яркость около 30 *дсб*.

В качестве источников света применяются электрические лампы накаливания трех типов: нормальные осветительные лампы мощностью 300 ... 1 000 *вт*, зеркальные лампы мощностью 300 ... 500 *вт* и специальные прожекторные лампы мощностью 300 ... 3 000 *вт* (табл. 1). Срок службы последнего типа ламп — 400 *час*. Прожекторные лампы прошли эксплуатационные испытания.

Таблица 1

Тип ламп	Напряжение, *в*	Мощность, *вт*	Световой поток, *лм*	Световая отдача, *лм/вт*	Диаметр колбы, *мм*	Полная длина, *мм*
ПЖ-50	220	360	4 900	13,6	97	180
ПЖ-51	220	550	8 500	15,4	112	195
ПЖ-52	220	1 100	17 000	15,4	132	220
ПЖ-53	220	3 150	58 300	18,5	97/122	390

Большие перспективы для освещения фасадов высотных зданий сулят ртутные лампы сверхвысокого давления, обладающие яркостью более чем в 10 раз выше яркости прожекторных ламп накаливания. Проведено испытание опытной серии подобных ламп типа РПШ мощностью 250, 500 и 750 *вт*.

Для архитектурного освещения основным осветительным прибором является прожектор. Однако выпускаемые электропромышленностью прожекторы заливающего света по своим световым характеристикам не подходят для данной цели. Поэтому были разработаны опытные образцы новых прожекторов для фасадного освещения типа ПФС-35, ПФС-45 и ПФС-60 с параболическими стеклянными отражателями и различными рассеивателями (табл. 2).

Таблица 2

Тип прожектора	Источник света			Максимальная сила света, 10^3 *св*	Углы рассеяния				Коэффициент полезного действия, %
	Тип	Напряжение, *в*	Мощность, *вт*		Вертикальная плоскость		Горизонтальная плоскость		
					верх	низ	правая	левая	
ПФС-60-1	ПЖ-53	220	3 150	1 500	2,5	2,5	3	3	30
ПФС-45-1	ПЖ-52	220	1 100	750	3	3	3,5	3,5	35
ПФС-45-2	ПЖ-52	220	1 100	125	14	11	7	7	30
ПФС-45-3	ПЖ-52	220	1 100	150	22	8	6	6	30
ПФС-35-1	ПЖ-50	220	360	350	3	3	3	3	30
ПФС-35-2	ПЖ-50	220	360	25	14	10	7	7	25
ПФС-35-3	ПЖ-51	220	550	80	20	8	6	6	25
ПФС-35-4	ПЖ-50	220	360	30	3	3	19	19	25

Для цветного освещения в прожекторе имеется рамка для светофильтров.

Архитектурное освещение фасадов МГУ требует 520 *квт* электрической энергии и для иллюминационного освещения дополнительно 150 *квт*. Устанавливается стационарно 826 прожекторов. Мощность прожекторов и приборов с зеркальными лампами для праздничного архитектурного освещения административного высотного здания на Смоленской площади составляет 315 *квт*; иллюминационное освещение — 130 *квт* и каждодневное — 120 *квт*. При праздничном архитектурном освещении прожекторы снабжаются светофильтрами оранжевого и голубого цвета. Площадка перед входом освещается при помощи двух декоративно оформленных обелисков высотой 16 *м*; здесь устанавливаются люминесцентные лампы, заключенные в теплоизолирующие стеклянные трубки.

Общая мощность праздничного архитектурного освещения высотного здания Министерства путей сообщения у Красных ворот — 228 *квт*, иллюминационное освещение требует дополнительно 150 *квт*. Для оборудования освещения нужно 246 прожекторов, 220 арматур с зеркальными отражателями и около 3 500 нормальных ламп мощностью 25 и 40 *вт*.

Благодаря рациональному использованию новейших достижений светотехники прекрасная советская жизнеутверждающая архитектура высотных зданий Москвы будет хорошо видна и в вечернее время.

(Известия АН СССР, Отделение технических наук, № 11, 1952.
Н. В. Горбачев).

ЗА РУБЕЖОМ

14-Я СЕССИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕТЯМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПАРИЖЕ

(Обзор)

14-я сессия международной конференции по электрическим сетям высокого напряжения, в которой приняло участие более 40 стран, состоялась в Париже с 28 мая по 7 июня 1952 г.

На сессии присутствовало более 1 300 делегатов. Советский Союз был представлен делегацией в составе: доктора техн. наук Ю. В. Буткевича, кандидата техн. наук В. А. Веникова и директора Отделения дальних электропередач ТЭП инж. А. И. Миролюбова.

Конференция обсудила около 150 докладов по различным вопросам сетей высокого напряжения и оборудования для них. Доклады, представленные от Советского Союза, осветили ряд вопросов, связанных с передачей энергии на очень большие расстояния, в частности с передачей Куйбышев — Москва.

Вопросы, поставленные на обсуждение делегацией Советского Союза, были восприняты делегатами многих стран с большим интересом и свидетельствовали перед лицом международной энергетической общественности о широчайшем размахе мирного хозяйственного развития в Советском Союзе.

В настоящем обзоре кратко освещены дискуссии по основным вопросам на 14-й сессии 1952 г.

Генераторы и устойчивость систем. В этой секции оживленную дискуссию вызвал доклад О. Гесса (Швейцария), посвященный выбору параметров синхронных машин, в особенности понятие «естественная постоянная времени разбега»:

$$T_{A\,ест} = \left(\frac{\pi}{60}\right)^2 \cdot GD^2_{норм} \frac{n^2}{N_{ква}}$$

при нормальном маховом моменте. Приведенные докладчиком кривые показали, насколько велик разброс этого параметра для машин, изготовленных различными заводами. Причина заключается в различных взглядах конструкторов на роль и значение этого параметра.

Высказывалось, например, мнение, что в некоторых случаях, имея в виду обеспечение устойчивости, более целесообразно снижать переходное реактивное сопротивление, чем прибегать к дорогому повышению махового момента. При этом можно было бы допустить временное повышение скорости вращения генератора до 50% при внезапном сбросе полной нагрузки. Г. Гаден (Швейцария) доказывал необходимость обеспечения достаточно большой постоянной времени разбега для гидрогенераторов. При малом значении этого параметра необходимо достичь весьма высокого быстродействия органов регулирования, что представляет значительные трудности.

Предложения о нормировании генераторных напряжений были поддержаны лишь в части генераторов малой и средней мощности. Согласно мнению ряда участников дискуссии в области мощного генераторостроения необходимо оставить за изготовителем некоторую свободу в выборе номинального напряжения, что позволит выбирать для генераторов соответствующих мощностей наиболее целесообразную конструкцию обмотки. Не вдаваясь в детали выполнения изоляции на высокие напряжения, сессия отметила возможность выполнения генераторов больших мощностей на напряжения до 50 *кв*.

По вопросам эксплуатации и контроля работы турбогенераторов главное внимание было уделено рассмотрению возможных повреждений обмоток роторов: 1) в результате тепловых воздействий при несимметричных нагрузках; 2) вследствие выпадения из синхронизма; 3) работы в асинхронном режиме; 4) при пуске и отключении. Указывалось, в частности, что при надлежащем выполнении конструкции ротора нет необходимости отключать турбогенераторы при каждом выпадении из синхронизма. Отмечались преимущества предварительного прогрева роторов при пуске. Однако опыты Г. Иоссе (Франция) с машиной мощностью 71 000 *ква* дали отрицательные результаты — при пуске не удавалось избежать искривлений и сдвигов в обмотке ротора. Теоретические соображения показали, что при смещениях обмотки значительную роль играют соотношения между тепловыми постоянными времени обмоток, стали и изоляции.

Совершенно отчетливо выяснилось, что еще нет достаточного эксплуатационного опыта в отношении контроля температуры и для определения допустимых значений усилий при асинхронном режиме работы и при несимметричных нагрузках. Указывалось между прочим, что для теплового контроля обмоток достаточно замерять температуру ротора.

При рассмотрении вопросов устойчивости при недовозбуждении и при отрицательном возбуждении было отмечено, что в случае генераторов с ручной регулировкой или с простыми регуляторами напряжения, как правило, внешнее емкостное нагрузочное сопротивление должно быть равно или больше синхронного продольного реактивного сопротивления X_d генератора ($N_{смакс} = u^2/X_d$). Дополнительные стабилизирующие регулировочные органы, реагирующие на угол между осью полюсов ротора и напряжением на зажимах, позволяют при отрицательном возбуждении повышать емкостную нагрузку почти вплоть до значения $N_c = u^2/X_q$.

Особо отмечалась важность векторных диаграмм для изображения переходных режимов и их осциллографической записи. На эту тему был показан кинофильм.

В подробных докладах о различных способах повышения устойчивости систем и передаваемых мощностей подчеркивалась огромная эффективность последовательно включенных конденсаторов. Этот вопрос, еще находящийся в начальной фазе своего развития, вызвал оживленную дискуссию, а именно: о месте установки конденсаторов (на промежуточных станциях или в середине каждого участка линий), о степени компенсации, о допустимых перенапряжениях при коротких замыканиях и необходимой защите от них; далее о том, можно ли вести разработку конденсаторов последовательного включения на основе опыта применяемых сейчас конденсаторов параллельного включения или же здесь требуются совершенно новые решения. Согласно американскому опыту в системах с большим числом промежуточных станций более экономична установка конденсаторов на промежуточных станциях. На шведских установках со сравнительно меньшим числом промежуточных станций конденсаторы последовательного включения пришлось установить также в середине участков линии.

Указывались самые различные цифры допустимых перенапряжений при коротких замыканиях в пределах от двух- до четырехкратного номинального напряжения конденсаторов при весьма различных длительностях этих замыканий.

В отношении необходимой степени компенсации линий назывались значения вплоть до 75%.

Дискуссия выявила, что при работе линий с последовательной компенсацией повышаются требования к регулировке напряжения и увеличиваются тепловые нагрузки успокоительных обмоток возбуждения генераторов. Отмечалось также применение синхронных компенсаторов с конденсаторами последовательного включения, которые при коротких замыканиях и ударных нагрузках весьма эффективно поддерживают напряжение большими реактивными мощностями. Это защищает питающую сеть от сильных колебаний напряжения и бросков реактивных токов, особенно в электропечных установках.

Наряду с известными электронными счетными устройствами, предназначенными для более быстрого выполнения больших расчетных работ, связанных с решением вопросов устойчивости и регулирования, в некоторых докладах описывались лабораторные схемы для непосредственного воспроизведения переходных режимов в сетях с одновременной их записью на осциллографе.

Изменение характеристических величин во времени можно непосредственно зафиксировать с помощью небольших вспомогательных машин, так называемых микромашин, с регулируемыми постоянными.

В дискуссии обсуждался вопрос о советской модели линии электропередачи 400 *кв* Куйбышев — Москва, исследовавшейся с применением микромашины. Машина была специально изготовлена для изучения вопросов устойчивости этой линии длиной свыше 900 *км*. Исследованию устойчивости с помощью микромашин был посвящен специальный доклад В. А. Веникова. При исследовании применялись небольшие вращающиеся машины, характеристики которых (например, реактивное сопротивление, успокоение, магнитные постоянные времени и маховые моменты) поддаются регулировке.

Уже при рассмотрении упомянутого вопроса о повышении устойчивости синхронных машин выявился большой интерес к регулировочным устройствам, обеспечивающим устойчивую работу при слабо нагруженных линиях (при сильно недовозбужденных генераторах), и к генераторам, допускающим повышенную емкостную нагрузку. Применяя дополнительные регулировочные органы, очевидно, удастся строить более экономичные генераторы с меньшим отношением короткого замыкания и динамически более устойчивые.

Трансформаторы. В прениях по трансформаторам наибольшее место занимал вопрос об импульсных испытаниях трансформаторов и обнаружении повреждений изоляции обмоток при этих испытаниях. Этой проблеме и связанным с ней вопросам были посвящены 11 из 20 докладов, прочитанных в данной секции. При обсуждении вопроса об импульсных испытаниях трансформаторов мнения разделились. Все выступавшие признавали необходимость импульсных испытаний. Однако часть делегатов, в особенности шведские, предлагали ввести только импульсные испытания полной волной, обосновывая свое мнение тем, что в настоящее время надежное обнаружение повреждений осуществимо лишь при испытаниях полной волной. Они указывали на то, что при испытаниях срезанными волнами разряд на параллельно включенном срезающем промежутке вызывает высокочастотные колебания в нуле испытуемого трансформатора; вследствие этого дополнительные колебания, обусловленные пробоем в трансформаторе, не могут быть обнаружены с достаточной надежностью. Поэтому Провоост (Голландия) в своем докладе рекомендовал методику испытания срезанной волной, при которой фронт волны удлиняется до 5 ... 10 *мксек*, так что в обмотке могут возникнуть значительные градиенты напряжения лишь вследствие крутого спада напряжения при разряде на вводе. Для того чтобы облегчить обнаружение дефекта в случае пробоя в обмотке, необходимо поддержать возможно более длительное горение дуги в поврежденном месте, несмотря на исчезновение напряжения на вводе. Провоост предложил: или проводить одновременно импульсное испытание обмотки одного из соседних стержней, или осуществлять возбуждение трансформатора переменным напряжением для поддержания тока в дуге. Докладчик полагает, что первый способ заключает в себе особенно большие возможности, хотя и требует сравнительно сложной схемы соединения. Необходимо отметить, что некоторые участники дискуссии отклонили предложения Провооста.

В своем докладе Бельди (Швейцария) снова рекомендовал наряду с чисто электрическими методами обнаружения повреждений одновременное применение своего электроакустического прибора, в особенности при испытаниях срезанной волной. Правда, швед Бекман утверждал, что метод Бельди не дает удовлетворительных результатов при витковых замыканиях.

Следует отметить точку зрения Хиклинга (Англия) на импульсные испытания срезанными волнами; он показывал катодные осциллограммы тока в нуле трансформатора при таких испытаниях, на которых совершенно четко обнаруживались междувитковые замыкания после среза волны на вводе трансформатора. Можно предполагать, что эти осциллограммы были получены для обмоток с очень тесной емкостной связью между началом и концом обмотки; для обычных же концентрических обмоток метод осциллографирования тока в нуле трансформатора, повидимому, непригоден для импульсных испытаний срезанной волной. То же самое можно сказать и об определении места повреждения, исходя из осциллограммы тока в нейтрали, так как в большинстве случаев начало искажения осциллограммы можно определить лишь весьма приближенно.

Во всяком случае после дискуссии на сессии создалось впечатление, что в ближайшее время всеобщее признание может получить лишь испытание полной волной.

Тепловым проблемам, поставленным в некоторых других докладах, было уделено значительно меньше внимания, чем вопросам импульсных испытаний.

Выключатели. Значение, придаваемое выключателю в рамках высоковольтных мощных электропередач, видно из того, что из общего числа около 150 докладов 12 было посвящено непосредственно проблемам высоковольтных выключателей.

В четырех докладах рассматривались перенапряжения, обусловленные отключением трансформаторов и линий, работающих в режиме холостого хода. В центре внимания находились средства ограничения этих перенапряжений и допустимые их амплитуды. 14 участников дискуссии изложили свою точку зрения по поводу поднятых вопросов.

Неразрешенным остался вопрос о том, можно ли, следуя определенным принципам коммутации, ограничить перенапряжения, возникающие при отключении холостых линий и трансформаторов, до значений, которые изоляция сети сможет без всякой опасности выдержать, или же следует для защиты отдельных частей электроустановки (в особенности трансформаторов) рекомендовать использование разрядников, срабатывающих при возникновении перенапряжений. Некоторые из выступающих утверждали, что современные высоковольтные выключатели не вызывают опасных перенапряжений. Другая группа участников дискуссии считала, что вопреки заверениям изготовителей существуют выключатели, которые, как показывает опыт эксплуатации, обусловливают при отключении холостых трансформаторов возникновение недопустимо высоких перенапряжений, и что поэтому целесообразно применять аппараты для защиты от перенапряжений. Эта группа выступавших считала, что количество энергии, поглощаемое при этом разрядниками, настолько мало, что задачу защиты сетей можно возложить на обычные разрядники, предназначенные для защиты от перенапряжений.

Второй большой комплекс докладов был посвящен вопросу частоты, скорости нарастания и амплитуде восстанавливающегося напряжения при отключении коротких замыканий. По этому вопросу не была найдена единая точка зрения; значения, названные американцами и англичанами, были выше швейцарских, шведских и французских рекомендаций.

В сравнении с состоянием вопроса несколько лет назад наши знания по проблеме восстанавливающегося напряжения при отключении коротких замыканий значительно возросли; количество измерений в эксплуатационных условиях и число теоретических работ непрерывно увеличиваются. В различных странах предъявляются разные требования в части величины восстанавливающегося напряжения. Некоторые из участников дискуссии считали, что необходимо учитывать будущее развитие и что не следует создавать трудностей потребителям путем преждевременного нормирования исходных данных. Другие, руководствуясь экономическими соображениями, требовали введения регламентации: предлагалось стандартизировать два значения восстанавливающегося напряжения и предоставить будущему разрешение вопроса о том, возможно ли однозначное решение. Высказывалось пожелание, чтобы по крупным испытательным установкам были опубликованы параметры восстанавливающегося напряжения, как это уже сделано в Англии. Особо подчеркивалось значение исследования условий восстановления напряжения в сетях путем непосредственных опытов в энергосистемах, а также путем измерений на расчетных столах, как это предлагается исследовательскими институтами в Англии.

Обсуждению были подвергнуты еще три доклада. Первый из них был посвящен измерениям остаточного тока и остаточной проводимости дуги в выключателях. Результаты таких измерений могут служить для оценки работы выключателя и для суждения о свойствах выключателей при косвенных испытаниях на разрывную способность, проводимых на испытательных установках с ограниченной мощностью. Дискуссия по докладу, в которой участвовало семь делегатов, показала, что, с одной стороны, существует большой интерес к этому вопросу и в будущем ожидают от его изучения много полезного, но что, с другой стороны, измерения остаточных токов в дуговом промежутке связаны со значительными трудностями.

Второй доклад касался испытаний воздушного выключателя фирмы BBC, проведенных в 1951 г. на электростанции Грэнд Кули. По докладу выступили три делегата. Обсуждались требования к современным мощным выключателям для высоковольтных систем и указывалось на большое экономическое значение испытаний в энергосистемах. По словам одного американского делегата, такие испытания уже позволили сэкономить значительные средства.

Председатель секции выключателей обратился к крупным энергосистемам всех стран с призывом предоставлять свои сети для такого рода опытов.

Оживленная дискуссия развернулась вокруг французского доклада о тенденциях развития высоковольтного выключателестроения. В докладе содержались предложения подвешивать выключатели с помощью нормальных подвесных изоляторов к железным конструкциям электростанции. Проведенный позднее осмотр смонтированных таким образом выключателей на испытательной станции в Фонтенее подтвердил первое впечатление о том, что полезность этого предложения заслуживает тщательного изучения.

В целом дискуссия показала, что в области высоковольтной коммутационной аппаратуры на сегодняшний день имеется еще большое число очень важных неразрешенных вопросов.

Кабели. В итоге работы сессии создалась полная картина современного состояния кабельной техники на сверхвысокие напряжения в различных странах. Выяснилась возможность передачи трехфазного тока 380 *кв* с помощью кабелей. Необходимая при этом толщина изоляции лишь не намного превышает толщину изоляции кабелей на 220 *кв*, которые, начиная с 1936 г., применяются в широком масштабе для электроснабжения Парижа. Новым в конструкции кабелей на 380 *кв* является выполнение значительной части их изоляции из очень тонкой, весьма плотной сатинированной бумаги. При намотке такой бумаги избегают ненужных напряжений на изгиб. Бумажная изоляция пропитывается специально подобранным маслом малой вязкости, поступающим в нее снаружи через канавки в свинцовой оболочке и изнутри через полую жилу под давлением 15 *ати*. Свинцовая оболочка бронирована тремя слоями металлической ленты.

Из дискуссии стало ясно, что кабели под высоким давлением в стальных трубах имеют ряд достоинств. После длительной успешной эксплуатации ряда таких кабелей в Европе и Америке их стали широко применять в Америке. Вследствие их большой прочности значительный интерес представляет применение алюминиевых оболочек для всех видов кабелей.

На кабельной секции можно было услышать новое о скоростных методах изготовления кабельных муфт и воронок. Для кабелей 380 *кв* воронки изготовляются на заводе и при монтаже кабеля надеваются на его конец. Применяется (в частности, в Германии) секционирование воронок конденсаторами для равномерного распределения напряжения по всему концу кабеля. Аналогично можно секционировать и крупные фарфоровые изоляторы.

Рассматривался также вопрос о наиболее целесообразной прокладке морских кабелей высокого напряжения и большой длины. Основной интерес представляли два решения: прокладка с парома и применение плавающих барабанов, с которых сматывают кабель; второй метод применялся во время войны для прокладки через Ламанш трубопроводов для горючего.

Были продемонстрированы кинофильмы, наглядно показывающие монтаж и прокладку морских кабелей 380 и 120 *кв* в Швеции, а также прокладку одножильных кабелей 50 *кв* в устьях рек в Голландии.

Наконец, были обсуждены и приняты проекты норм на испытание и защиту кабелей от коррозии. Проекты должны быть переданы в МЭК для принятия их в качестве рекомендаций.

Необходимо еще отметить, что все большее значение приобретают испытания кабелей постоянным напряжением, особенно кабелей на сверхвысокие напряжения. Эти испытания значительно проще и благодаря их связи с импульсной прочностью позволяют судить об эксплуатационных качествах кабеля.

Делегаты сессии имели возможность ознакомиться с французскими кабельными заводами и с испытательной станцией для кабелей и высоковольтных выключателей в Фонтенее, построенной Главным управлением электроснабжения Франции. Испытание кабелей производится там несколько иначе, чем в других европейских лабораториях. Испытуемые кабели присоединены к линии 220 *кв* Парижской сети и находятся, таким образом, непрерывно под рабочим напряжением этой сети. Нагрузка кабелей осуществляется так, что кабельные жилы образуют замкнутые витки, получающие нагрузочный ток от трансформаторной установки, к которой кабели присоединены таким образом, что образуют вторичную обмотку. Новое заключается здесь в том, что на изоляцию воздействуют только

напряжение сети и его колебания, в то время как испытательный ток индуктируется в жилах извне.

Воздушные линии. В центре внимания стояли вопросы, связанные с возможными облегчениями воздушных линий электропередачи. С этим тесно связан вопрос о необходимости введения в расчеты более точных данных о ветровой нагрузке и весе льда на проводах. Разработаны методы расчета, основанные на ценных результатах экспериментальных исследований макетов в натуральную величину и на моделях (Аэродинамический институт в Геттингене, Французская энергетическая компания). Рассматривалось поведение одинарных и расщепленных проводов; было установлено, что особенно подвержены образованию льда тросы, находящиеся под рабочим напряжением, хотя имеются и противоположные наблюдения. Особенно оживленно обсуждался характер ветровой нагрузки на провода. В частности, обсуждалось то обстоятельство, что трос обладает определенной жесткостью и, будучи натянут, под действием максимальной ветровой нагрузки в нем возникают напряжения на кручение. В этой связи указывалось также на то, что при прочих равных условиях завихрения воздушных потоков могут сказаться по-разному. При правильном учете всех факторов можно согласно общему мнению добиться снижения веса опор, особенно при больших пролетах.

В связи с ощущающейся всюду необходимостью повышения передаваемых мощностей большой интерес вызвал опыт перестройки линий. В докладе Лейпольда (Канада), посвященном перестройке линии со 165 на 230 *кв*, в частности, сообщалось об увеличении поперечного сечения проводов путем домотки на них нескольких слоев проволоки. Стоимость такой перестройки составляет около 50% от стоимости новой воздушной линии. Вместо описанного способа увеличения сечения проводов, применяемого также и в Швейцарии, в Швеции предпочитают применение расщепленных проводов. К имеющемуся проводу подвешивают дополнительный провод, расположенный рядом с ним в горизонтальной плоскости, если дополнительный провод такой же, как основной, и в вертикальной, если дополнительный провод отличается от основного. Правда, при этом способе в некоторых случаях требуются значительно большие усиления опор, чем при увеличении сечения основного провода. Общее мнение сводилось к тому, что при перестройках линий необходимо особенно тесное сотрудничество между теоретиками, конструкторами и работниками эксплуатации.

В качестве примера возможного экономичного повышения мощности указывалось на опыт работы линии, построенной на 110 *кв*, под напряжением 150 *кв*, причем до настоящего времени никаких ненормальностей в работе линии не обнаружено. Однако по мнению большинства еще нет достаточного опыта с проведением такого рода мероприятий и к ним следует подходить с осторожностью.

В секции опор дискутировался вопрос о правильном определении ветровой и ледовой нагрузок. Подчеркивалась необходимость выяснения динамических усилий и возможности снижения принимаемой статической нагрузки в соответствии с фактическими условиями. Особенно здесь интересовала величина действительной ветровой нагрузки. Указывалось, что в большинстве случаев наблюдаются лишь сравнительно незначительные колебания гирлянд подвесных изоляторов. При переходе на большие пролеты между опорами считают возможным снизить обычно принимаемые расчетные ветровые нагрузки. Мнения о том, в какой мере следует считаться с возможностью обрыва проводов, разделились, так как вероятность такой нагрузки оценивалась по-разному.

В одном из английских промышленных районов, в котором необходимо было считаться с усиленной коррозией, применили опоры из алюминиевого сплава. Стоимость этих опор сравнительно велика. Вопрос о надежности конструкции опор из сплава алюминия заслуживает особого внимания потому, что модуль упругости такого сплава отличается от модуля для стали.

Представляло также интерес сообщение о конструкции сборной опоры из отдельных трубчатых элементов.

Темой одного американского доклада было изготовление бетонных опор с созданием в них предварительного напряжения. Отмечалось, что такие опоры с предварительным напряжением имеют меньший вес, чем бетонные опоры обычной конструкции, и хорошо себя оправдали в производстве и эксплуатации. До настоящего времени сооружено 25 000 опор этой конструкции высотой до 18 *м*.

В докладе о фундаментах для опор сообщалось о различных способах закрепления опор в грунте и, в частности, о «буровой свае», которая, правда, применима лишь в некоторых грунтах: в грунте создается цилиндрическое углубление небольшого диаметра, расширяющееся внизу в виде сферы. Образующееся пространство заливается бетоном. Прочность такого фундамента достигается главным образом благодаря тесной связи бетона с грунтом. Согласно всеобщему мнению для проектирования экономичных и правильных по размерам фундаментов опор чрезвычайно важно надежно оценить свойства грунта и в случае необходимости провести его испытание. Что касается фактической величины коэффициента запаса опор, то возникающие здесь вопросы не были еще достаточно уяснены.

В области линейных изоляторов наряду с французским и канадским докладами об эксплуатационных нагрузках и опыте эксплуатации изоляторов привлек внимание делегатов английский доклад о колпачковых изоляторах из закаленного стекла. В дискуссии было отмечено, что внутренние натяжения, возникающие в закаленном стеклянном изоляторе в процессе его изготовления, могут с течением времени привести к перегруппировке усилий, на которые оказывает влияние также и род нагрузки. До настоящего времени еще не разработаны методы испытаний, которые позволяют надежно судить об этих процессах в стеклянном литье; кроме того, пока еще отсутствуют результаты длительных испытаний таких изоляторов.

Перенапряжения и защита от перенапряжений. Представленные и обсуждавшиеся доклады по вопросам перенапряжений и защиты от перенапряжений можно разбить на три группы: 1) работа высоковольтных линий при атмосферных перенапряжениях; 2) устройства для защиты от перенапряжений; 3) заземления.

Для разрешения вопроса о правильном выборе линейной изоляции с точки зрения атмосферных перенапряжений рекомендовались как статистически-эмпирический, так и чисто расчетный методы. Расчет возникающих перенапряжений возможен в том случае, если принять определенные значения амплитуды, крутизны токов молнии и сопротивления заземлений опор.

Попытка связать уровень изоляции линий с количеством грозовых дней в году для данной местности была признана неосуществимой. Количество гроз в данной местности еще не позволяет судить о числе разрядов молнии на землю, в то время как только это число и имеет практическое значение. Кроме того, поражаемость линий в местностях с одинаковым количеством грозовых дней в году может быть различной в зависимости от направления трассы линии по отношению к преобладающему направлению движения грозовых облаков.

В странах, в которых применяется глухое заземление нейтрали, большое внимание уделяется числу ежегодных отключений линии, обусловленных однофазными замыканиями на землю. Стремление, по возможности, обезопасить линии от этих замыканий привело к предложению применять для высоковольтных линий деревянные траверзы в надежде, что большая длина дуги приведет к ее самопогасанию в случае возникновения однофазных коротких замыканий.

Почти все страны признают техническую и экономическую целесообразность применения вентильных разрядников для защиты станционных аппаратов и трансформаторов. Неожиданным было известие о том, что Франция считает возможным отказаться от установки разрядников в высоковольтных сетях и ограничиться применением обычных защитных искровых промежутков. Правда, в этой связи предлагалось несколько смягчить крутое спадание напряжения при разряде на промежутке путем шунтирования части промежутка полупроводником, благодаря чему разряд происходит в два этапа.

В Швеции разрядники считаются нормальными защитными аппаратами для напряжений до 380 *кв*. Число выходов из строя разрядников там чрезвычайно мало: указывалась цифра порядка 0,5 на каждые 100 разрядников в год, полученная на основании 12-летнего опыта с 1 750 разрядниками.

На основании многочисленных опытов было далее установлено, что импульсное разрядное напряжение разряд-

ников не зависит ни от погоды, ни от времени года. Разброс разрядных напряжений разрядников меньше, чем стержневых и шаровых промежутков при равных условиях. Разрядники, включенные в нейтраль трансформаторов, срабатывают в 2—3 раза чаще, чем разрядники, включенные между одной из фаз и землей, что приводит к рекомендации, по возможности, применять «нулевые» разрядники в системах с изолированной нейтралью. Стремление заводов-изготовителей непрерывно повышать значения импульсных токов, которые способны отводить разрядники, является бесцельным, поскольку, как выяснилось, большинство токов, замеренных в цепи разрядников, не превышало 1 000 *а*. Точно так же современные промышленные разрядники легко, без чрезмерного перегрева справляются с отводом магнитной энергии реакторов и трансформаторов при их отключении от сети и с отводом электростатических перенапряжений при отключении холостых линий. Лишь при весьма длинных линиях 400 *кв* необходимо проверить, не повредятся ли разрядники при отключении полностью заряженной линии. Главными «врагами» разрядников являются, во-первых, прямые удары молнии, которые необходимо предотвращать путем применения заземленных тросов вблизи станций и над станциями, и, во-вторых, перемежающиеся дуговые замыкания на землю.

Специальный доклад был посвящен вопросу о том, каким образом кабельные вставки могут служить для защиты от перенапряжений и каким образом можно осуществить защиту этих вставок разрядниками. В Швеции удалось сравнить результаты теоретических разработок с практическими измерениями. Выяснилось, что оба конца кабеля следует защищать разрядниками, включенными в местах соединения кабеля с воздушной линией, при соблюдении следующих условий: максимальная амплитуда волн, набегающих со стороны воздушной линии, не должна превышать 2,5-кратного уровня изоляции установки, находящейся за кабелем, и воздушная линия должна иметь заземленный трос, длина которого должна быть по крайней мере в 8 раз больше длины кабеля.

При обсуждении вопроса о заземлении опор и станций подтвердилось мнение, что пластинчатый заземлитель хуже стержневых, расположенных радиально. В сетях с глухозаземленной нейтралью большое значение приобретает вопрос о перепадах напряжения в земле при однофазных коротких замыканиях. Не рекомендуется сквозная прокладка заземленных тросов в земле, так как это приводит к расширению опасной с точки зрения шагового напряжения зоны. Осуществить хорошее заземление небольших станций зачастую сложнее, чем крупных, вследствие малой протяженности заземлителей.

Электропередача на сверхвысоких напряжениях. Основной докладчик Кайен (Франция) сообщил, что за время, прошедшее с сессий 1948 и 1950 гг., на которых докладывалось о проектах и результатах первых опытов, исследование и расширение электроустановок на сверхвысокие напряжения свыше 220 *кв* значительно продвинулись вперед.

В ряде докладов содержались данные о конструкции и планировке сверхвысоковольтных сетей в СССР, Англии, Швеции, США.

В настоящее время строятся и эксплуатируются следующие линии электропередачи на напряжении свыше 220 *кв:*

1) 400 *кв* (СССР): Куйбышев—Москва, сдвоенные провода;

2) 287 *кв* (США): Болдер дэм—Лос Анжелос (1937 г); диаметр проводов 36 *мм;*

3) 380 *кв* (Франция): линия спроектирована на это напряжение, но в настоящее время работает под напряжением 230 *кв*, сдвоенные провода;

4) 380 *кв* (Швеция): сдвоенные провода;

5) 275 *кв* (Англия): линия строится в качестве одного из элементов сверхвысоковольтной сети, которая создается наряду с существующей сетью 132 *кв*, расщепленные провода;

6) 287 *кв* (Канада): линия находится в процессе сооружения, диаметр проводов 57,5 *мм*;

7) 330 *кв* (США): сооружается линия длиной 480 *км*, диаметр проводов 40 *мм*.

Все докладчики и выступавшие в прениях подчеркивали, что, наряду с существующими высоковольтными сетями, необходимо сооружение сетей на сверхвысокие напряжения для того, чтобы справиться с возрастающими трудностями передачи больших мощностей на дальние расстояния. Дальнейшее уплотнение высоковольтных сетей с существующими напряжениями неосуществимо по целому ряду причин. Переход на сверхвысокие напряжения в особенности диктуется необходимостью снижения стоимости электропередачи и компенсации возросшей стоимости выработки электроэнергии и строительных затрат.

Бросается в глаза разнобой в выборе номинальных напряжений. Во всех странах этот выбор был произведен на основе тщательной конструктивной и экспериментальной исследовательской работы, а также экономических изысканий. В США нет очень больших расстояний электропередачи. При нагрузке линий, равной 1,5...2-кратной натуральной мощности линии, оказывается возможным передавать необходимые мощности (450 *мва*) при напряжениях 315...330 *кв*. В Англии расстояния также невелики[1] между центрами потребления электроэнергии и гидроэлектростанциями. Поэтому с учетом особо тяжелых атмосферных условий выбор пал на напряжение 275...300 *кв*. Швеция считает правильным сделанный ею выбор напряжения 380 *кв*, учитывая при этом благоприятный опыт эксплуатации, а также планы дальнейшего расширения этой сети. На сессии сообщалось о планах удлинения шведской линии Харспрангет—Хальсберг, работающей уже в течение нескольких месяцев с напряжением 380 *кв*, на юг через Гетеборг до Гельсингборга и о плане сооружения третьей параллельной линии с севера на юг, которая должна быть готова к включению до 1955 г. Передаваемая мощность будет увеличена путем установки последовательно включенных конденсаторов; кроме того, запланирован переход на строенные провода (сталеалюминиевые провода 3×455 *мм*^{2}), в результате чего каждая линия сможет пропускать мощность до 800 *мва*.

Делегат Франции указал в дискуссии на то, что такой разнобой в выборе номинальных напряжений нерационален, так как это приведет к повышению стоимости установок; оптимальное напряжение вообще нельзя точно определить, если учесть неопределенность развития сетей в будущем и пологий характер кривой оптимального напряжения. Было отмечено, что Франция, Швейцария и Германия приняли напряжение 380 *кв*.

С целью повышения передаваемых мощностей сверхвысоковольтные линии выполняются с расщепленными проводами. Однако в Америке предпочитают одинарные провода в целях возможности осуществления их подогрева для удаления льда, а также учитывая удобства проведения ревизий и ухода за линией под напряжением.

Отмечалось также, что для связи между сетями со сверхвысокими напряжениями и существующими сетями 220...132 *кв* предпочитают автотрансформаторы, так как, во-первых, их можно изготовить транспортабельными на большие мощности и, во-вторых, ввиду их меньшей стоимости и меньших потерь по сравнению с нормальными силовыми трансформаторами.

Следует отметить решение шведских инженеров о том, чтобы при дальнейшем расширении сети 380 *кв* снизить уровень импульсной прочности изоляции линий с 1 775 до 1 500 *кв*. Такое снижение оправдывается опытом эксплуатации, а также тем, что с ростом мощности установок можно ожидать снижения перенапряжений промышленной частоты, возникающих при переключениях.

Другая группа докладов была посвящена результатам исследования короны на опытных установках, а именно: измерение потерь и радиопомех на английской опытной линии 275 *кв* и на опытной линии 500 *кв* Американской компании, а также на французской опытной 500-*кв* станции в Шевилли.

Прежние исследования короны на этих трех установках, о которых уже сообщалось в печати, были расширены применительно к различным расположениям проводов — двойных и одинарных (сталеалюминиевые сплошные и полые провода). Результаты показали, что, применяя рациональные конструкции, можно справиться с потерями на корону. При выборе формы, расположения проводов и расстояний между ними решающее значение имеет высокочастотное влияние линии электропередачи на провода свя-

[1] 80 *км* — среднее расстояние между станциями, в результате чего стоимость линий электропередачи не превышает примерно 40% стоимости всей установки.

зи. Обсуждение показало, что в этом направлении необходимы дальнейшие исследования.

Телемеханика. Большинство докладов было посвящено влиянию помех на провода систем телеуправления, обусловленных коммутационными процессами, грозовыми явлениями, индуктированными напряжениями и обрывами проводов. Кроме того, рассматривалась надежность питания высокочастотных приборов. Отметим следующие основные моменты из докладов.

В польском докладе рассматривалось влияние дефектов в силовой линии на высокочастотную связь, осуществляемую по этой линии. Если осуществлять высокочастотную связь не по одному, а по двум проводам, то можно рассчитывать на меньшее влияние помех из силовой сети. Хуже всего сказывается обрыв всех трех проводов при одновременном замыкании на землю, в то время как при обрывах и замыканиях на землю только одного или двух проводов высокочастотную связь еще можно поддерживать. Плохая погода усугубляет помехи.

Далее был зачитан шведский доклад о различных помехах в силовой линии и об их влиянии на высокочастотную связь и на осуществляемую с ее помощью селективную защиту. На основании обширного анализа всех возможных помех указываются средства, позволяющие ослабить влияние помех на высокочастотную передачу.

Шевалье и Андре (Франция) сообщили о новом применении высокочастотной связи через сверхвысоковольтные линии и о существенной экономии высоковольтной аппаратуры и распределительных устройств при осуществлении связи мощной гидроэлектростанции с сетью благодаря применению весьма совершенных высокочастотных приборов. Надежная система высокочастотного телеуправления и надзора за труднодоступной электростанцией Шастань позволила осуществить работу двух генераторов мощностью по 90 *мгва* по схеме блока с двумя трансформаторами и двумя линиями 225 *кв* длиной 20 *км* до подстанции Брэйль (Дордонь). Общая стоимость высокочастотной установки составляет менее одной четверти стоимости двух 225-*кв* выключателей, которые нужно было бы установить на электростанции Шастань при отсутствии системы телеуправления.

В английском докладе Митчелла рассматривалось питание вспомогательных цепей малой мощности. Основным источником питания служит батарея постоянного тока, зарядка которой осуществляется от сети через трансформатор и выпрямитель. В случае необходимости для питания цепей переменного тока следует использовать вибропреобразователь, присоединяемый к батарее. В качестве последнего резерва служит дизельная установка. В выступлениях в порядке прений метод Шевалье и Андре рассматривался как большой шаг вперед в деле передачи электроэнергии.

Кауфман (Англия) в прениях указал на способ уменьшения влияния помех в системах высокочастотной передачи сигналов. Роде (Швеция) высказал мнение, что скорость срабатывания высокочастотного канала должна быть менее 15...20 *мсек*, в то время как Шевалье считает достаточным 70 *мсек*, из которых 15 *мсек* требуется на переключение фаз.

В отношении вопроса обеспечения надежности питания высокочастотной аппаратуры мнения сильно разошлись. Это объясняется тем, что в каждой стране выбор системы питания производится на базе местных условий в части помех.

Релейная защита. Дискуссия была в основном посвящена двум вопросам: влиянию дуги и коммутационных процессов на защитные устройства, работающие с помощью высокочастотной связи, в особенности там, где имеется однофазное АПВ; статистике в различных странах срабатывания реле и причинам срабатывания.

Добсон и Мэзон (Канада) рассматривали условия для однофазного АПВ с учетом следующей за ним емкостной дуги и ложных срабатываний реле, которые при этом наблюдались.

Эльмлунд, Энгстром и Хольнер (Швеция) сообщили результаты исследований, касавшихся вредного влияния, оказываемого на релейную аппаратуру данной и соседней линий высокочастотными колебаниями, создаваемыми дугой и отключением выключателей. Кауфман (Англия) указал, что в Англии однофазное АПВ не применяется. Лакей (Англия) усматривает в высокочастотном излучении дуги причину ложных срабатываний защиты с применением высокочастотной связи. По его мнению, реле срабатывают слишком быстро, и они чрезмерно чувствительны. Эльмлунд (Швеция) возразил, что само по себе высокочастотное излучение дуги слишком слабо для того, чтобы обусловить ложные срабатывания. Значительно серьезнее помехи, создаваемые отключением первого сработавшего выключателя. Другие участники дискуссии указали на ряд мер по устранению помех, частично уже оправдавших себя на практике.

Сложилось общее впечатление, что проблема однофазного АПВ еще полностью не разрешена и что она требует особого внимания в разрезе всех систем защиты, работающих с высокочастотной связью.

Все выступавшие признавали необходимость наличия резервной защиты.

Вторая тема дискуссии — «Релейная статистика» — рассматривалась всеми в положительном смысле. Выступавшие приветствовали начало этой работы, однако указывали при этом, что принятая классификация причин срабатываний еще недостаточно ясна для того, чтобы получить полное представление о действенности различных защитных устройств. Для этого необходимо накопление дальнейшего опыта.

Литература

1. Материалы CIGRE.
2. ETZ, № 16, 1952.
3. Bull. ASE, № 16, 1952.

Б. и *К.*

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

За последние десятилетия с электронными усилителями стали конкурировать магнитные, кристаллические и, наконец, диэлектрические.

Диэлектрический усилитель, по существу, является электрическим аналогом магнитного усилителя. Здесь также требуются: переменный ток для питания, компенсационные схемы и выпрямители. Простейший диэлектрический усилитель — это конденсатор насыщения с изолятором из сегнетодиэлектрика (например, титаната бария). При подаче напряжения на конденсатор изменяется диэлектрическая постоянная изолятора, вследствие чего изменяется емкость конденсатора и его сопротивление переменному току. Изменяется и ток, проходящий через нагрузку, включенную последовательно с конденсатором и источником питания переменным током (рис. 1).

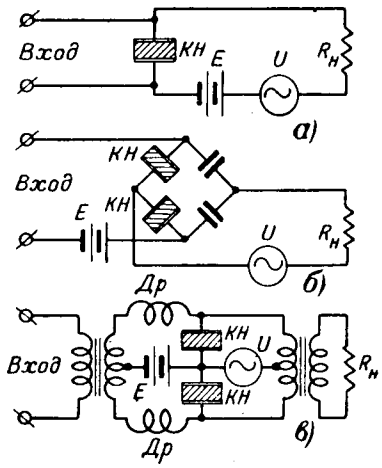


Рис. 1. Диэлектрические усилители постоянного тока и переменного тока низкой частоты.

а — простейшая схема; *б* — практическая схема; мостовое соединение применено для устранения влияния выходной цепи на входную; *в* — двухтактная схема. Благодаря наличию входного трансформатора пригодна только для переменного тока. Принятые обозначения; *КН* — конденсатор насыщения; $R_н$ — нагрузка; *U* — источник питания переменного тока; *E* — батарея смещения; *Др* — дроссель; *Вх* — вход.

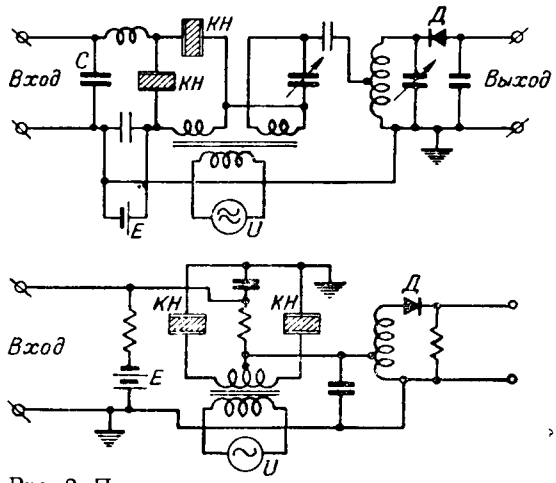


Рис. 2. Практические схемы диэлектрических усилителей звуковых частот.

U — источник питания высокой частоты; *КН* — конденсатор насыщения; *Е* — батарея смещения; *Д* — детектор; *Вх* — вход;

Как и магнитный, диэлектрический усилитель может служить для усиления как постоянного, так и переменного тока. Диэлектрические усилители могут применяться для автоматических регуляторов, в приборостроении, в радиоприемниках, в качестве реле, в фазоинверторах, модуляторах и т. п.

В качестве диэлектриков применяются титанат бария, некоторые комбинации его с титанатом стронция, а также цирконаты бария и свинца.

Эти материалы дают большие изменения ε при относительно небольших изменениях приложенного управляющего напряжения. Для всех них характерна сильная зависимость ε от температуры (эффект Кюри). В точке Кюри эти материалы имеют $\varepsilon = 1\,500 \ldots 10\,000$. Рабочая точка выбирается вблизи точки Кюри, лучше за ней, т. е. при несколько большей температуре, так как при этом получаются меньшие постоянная времени, пьезоэффект, дрейф и петля гистерезиса. Для компенсации влияния температуры можно при сложной схеме усилителя два конденсатора поставить в режим до точки Кюри, а два других — после.

В отличие от магнитного диэлектрический усилитель является усилителем напряжения, имеет сравнительно высокие входное и выходное сопротивления, поворачивает фазу напряжения на 180°. Опыт показал возможность применения диэлектрических усилителей на высоких частотах, вплоть до 10 *мгц*. Один из практически осуществленных диэлектрических усилителей имеет коэффициент усиления мощности 15 на частоте 4 000 *гц* (рис. 2). В лабораторных условиях получены усилители с усилением мощности до 10^6 на ступень.

Диэлектрические усилители обладают следующими достоинствами: чрезвычайная прочность, небольшие размеры, отсутствие перегорающей нити, отсутствие потребления энергии для подогрева, отсутствие времени подогрева, высокое входное сопротивление, высокое усиление. Недостатки диэлектрических усилителей: сильная зависимость от температуры (эффект Кюри), невысокий коэффициент мощности, необходимость источника питания переменного тока, ограниченное отношение входного и выходного сопротивлений.

Только в тех узких областях, где достоинства диэлектрических усилителей преобладают над их недостатками, они могут успешно конкурировать с электронными усилителями.

(Electronics, № 12, стр. 84, 1951. A. M. Vincent)

Инж. В. Ф. РЕМНЕВ

НОВЫЙ ЭЛЕКТРОВОЗ ДЛЯ ТОВАРНЫХ ПОЕЗДОВ

На Пенсильванской железной дороге в США для товарных поездов пущен новый электровоз однофазного переменного тока частотой 25 *гц*. Этот электровоз имеет обозначение: B-B-240/240-4GEA632 11 000 *в*, 25 *гц*.

Как показал опыт эксплуатации Пенсильванской железной дороги, четырехосные электровозы, к которым относится и данная модель, могут применяться как при одиночной, так и при групповой тяге.

Ниже приводятся его главнейшие данные.

Общий вес электровоза	109 *т*
Вес на движущую ось	27,25 *т*
Общая длина (по сцепке)	16 400 *мм*
Ширина	4 250 *мм*
База	5 200 *мм*
База тележек	3 350 *мм*
Диаметр ведущих колес	1 220 *мм*
Просвет между кожухом передачи и головкой рельсов	116 *мм*
Минимальный радиус вписывания в кривую	83 *м*
Максимальная конструктивная скорость	104 *км/час*
Скорость при часовом режиме работы тяговых двигателей	40,7 *км/час*
Тяговое усилие при 25%-ном сцеплении	2 725 *кг*
Тяговое усилие при длительном режиме работы	1 620 *кг*
Тяговое усилие при часовом режиме работы	1 760 *кг*

Электровоз питается от контактной сети напряжением 11 *кв* через силовой трансформатор 11 000/762 *в* при 25 *гц* мощностью 2 665 *ква*. Трансформатор электровоза имеет негорючее заполнение пиранолом.

На электровозе установлены четыре 16-полюсных тяговых двигателя однофазного тока 25 *гц* длительной мощности по 625 *л. с.* при 230 *в* каждый. При максимальной расчетной скорости электровоза 104 *км/час* тяговый двигатель развивает скорость вращения 1 800 *об/мин*. Тяговые двигатели имеют подвеску трамвайного типа с зубчатым зацеплением. Изоляция — класса B, и в рабочей схеме двигатели включаются в две параллельные группы по два последовательно соединенных двигателя в каждой.

Управление осуществляется путем регулирования напряжения с высоковольтной стороны трансформатора, а также ослаблением поля. Управление электровозом одностороннее по системе многих единиц, приводимое в действие электропневматической системой с переключением контроллером, имеющим 21 пусковую позицию, из которых 5 — ходовых и 16 — реостатного торможения.

Каждый тяговый двигатель имеет принудительную вентиляцию, работающую от самостоятельного вентиляторного агрегата, прогоняющего через двигатель 71 *м³/мин* воздуха.

Электровоз имеет 5 ходовых скоростей: от 0 до 4,8 *км/час* (при 40% поля двигателей); от 4,8 до 11,2 *км/час* (при 67% поля двигателей); от 11,2 до 41,5 *км/час* (при полном поле двигателей); от 41,5 до 64 *км/час* (при полном поле двигателей, но с измененным включением добавочных полюсов для повышения коммутационной стойкости двигателей).

В режиме торможения каждый тяговый двигатель развивает тормозное усилие, соответствующее мощности 750 *л. с.*

Электровоз может длительно работать при минимальной скорости 34 *км/час*, с устойчивой коммутацией тяговых двигателей, тогда как ранее выпускавшиеся электровозы допускали снижение скорости лишь до 41 *км/час*.

Для питания цепей управления и вентиляторов на электровозе установлен мотор-генераторный агрегат постоянного тока, используемый также для зарядки аккумуляторов. Компрессор с однофазным двигателем 25 *гц* дает 6,25 *м³/мин* воздуха при скорости вращения 725 *об/мин*.

Электровоз развивает при длительном режиме работы тяговых двигателей и скорости 42,5 *км/час* мощность на ось 625 *л. с.*, тогда как в режиме пуска и ускорения поезда до 53 *км/час* при 25%-ном сцеплении колес с рельсами каждая ось передает 1 300 *л. с.*

(El. Engineering, № 6, т. 71, стр. 547, 1952, F. D. Gowans B. A. Widell, A. Bredenberg

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН

ВИБРАЦИОННАЯ УСТАЛОСТЬ СТАЛЬНЫХ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ТРОСОВ

За последние годы в США возросло число повреждений от вибраций защитных стальных тросов, в частности тросов из проволок большой прочности. Для выяснения причин были поставлены лабораторные исследования, результаты которых кратко изложены в реферируемой статье.

Исследования производились с семипроволочным стальным тросом диаметром 7,9 *мм* ($^5/_{16}$″) из различных сортов стали; характеристики тросов приведены в таблице.

Материал проволоки \ Характеристика	Предел прочности на разрыв, *кг/мм²*	Предел выносливости (при +25°С), *кг/мм²*	Относительная выносливость
Обычная оцинкованная	53,2	24,6	46,3
Сименс-мартеновская сталь, оцинкованная	89,4	24,6	27,6
Высокопрочная сталь, оцинкованная	126,5	35,5	27,8
Сверхпрочная сталь, оцинкованная	154,5	36,7	23,8
Нержавеющая сталь	166	44,3	26,8

Примечание. Пределом выносливости называется то максимальное напряжение, которое материал должен выдерживать без повреждений при числе перемен знака напряжения, указанном в технических условиях. Относительной выносливостью названо процентное отношение предела выносливости к пределу прочности.

Результаты испытаний отдельных проволок при различных количествах циклов знакопеременной нагрузки показана на рис. 1 и 2.

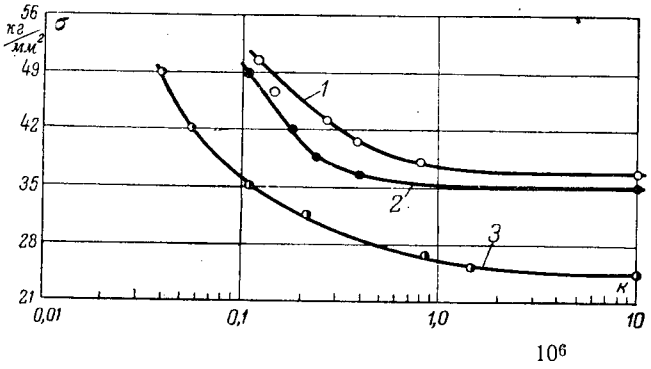


Рис. 1. Усталость проволок семипроволочного троса диаметром 7,9 *мм* при температуре 25°С при знакопеременной нагрузке.

1—сверхпрочная сталь; *2*—высокопрочная сталь; *3*—сименс-мартеновская сталь; *к*—количество колебаний; *σ*—напряжение.

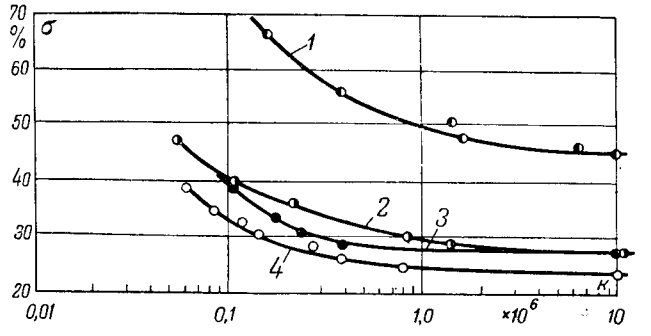


Рис. 2. Усталость проволок семипроволочного провода диаметром 7,9 *мм* при температуре 25°С при знакопеременной нагрузке, отнесенная к пределу прочности.

1—обычная проволока; *2*—сименс-мартеновская сталь; *3*—высокопрочная сталь; *4*—сверхпрочная сталь; *к*—количество колебаний; *σ*—напряжение.

Как и следовало ожидать, предел выносливости больше у проволок с высоким пределом прочности на разрыв. Однако относительная выносливость для сверхпрочной проволоки имеет наименьшее значение, что авторы объясняют влиянием оцинковки.

Температура влияет на предел выносливости незначительно. Например, при температурах —48, +25 и +93°С предел выносливости оказался соответственно равен: для сверхпрочной проволоки — 37,6; 36,7 и 36,5 *кг/мм²*, для проволоки из нержавеющей стали — 45,6; 44,3 и 44,3 *кг/мм²*.

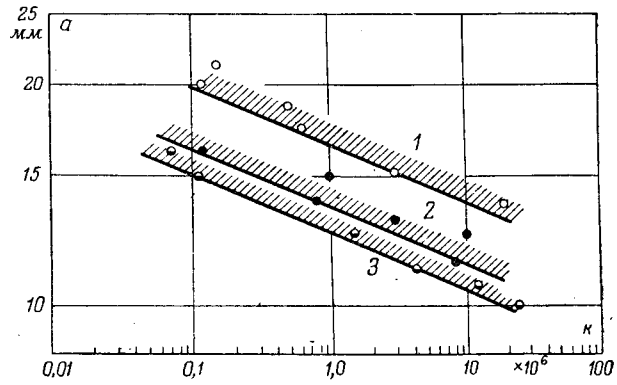


Рис. 3. Вибрационная усталость троса из сверхпрочной стали при частотах 65, 85 и 98 *гц* и натяжениях 725, 1 270 и 1 740 *кг*. Трос заделан в нормальный подвесной зажим.

а—амплитуда колебаний; *к*—количество колебаний; *1*—натяжение 725 *кг*; *2*—натяжение 1 270 *кг*; *3*—натяжение 1 740 *кг*.

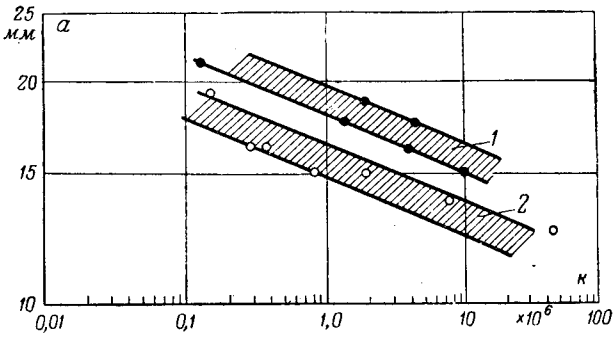


Рис. 4. Вибрационная усталость троса сверхпрочной стали с установкой и без установки армирующих прутков. Частота вибраций 78...85 *гц*, натяжение троса 1 270 *кг*. Трос заделан в специальный подвесной зажим.

а—амплитуда колебаний; *к*—количество колебаний; *1*—трос с армирующим прутком; *2*—трос без армирующего прутка.

Модуль эластичности при повышении температуры уменьшается (для перепада температур от —48 до +93° С уменьшение достигает примерно 4%).

Результаты испытания стального троса диаметром 7,9 *мм* из сверхпрочных проволок на вибрационную усталость представлены на рис. 3. При заделке троса в поддерживающий зажим болты затягивались с моментом 690 *кгсм*. Точками на диаграмме отмечено то количество циклов, при котором получается излом первой проволоки. Во всех случаях излом получался в зажиме в точке выхода троса из-под прижимной плашки. Разброс измеренных значений был очень велик. На диаграмме нанесены только нижние точки каждой группы.

Результаты испытаний сверхпрочного троса на вибрационную усталость при применении армирующих прутков представлены на рис. 4.

Выводы. 1. Желательно снизить рабочие натяжения в защитных стальных тросах до величин, соответствующих пределам выносливости, выявленным при опытах.

2. Весьма эффективным является применение армирующих прутков во всех точках подвеса в районах, где возможно возникновение вибраций.

3. Применение тросов из нержавеющей стали дает возможность при той же степени надежности работать с бо́льшими натяжениями троса.

В более поздней работе Danner'a (El. Eng., стр. 132, № 2, 1952) на основании анализа случаев повреждений тросов вследствие вибраций предлагается величину относительной выносливости принимать порядка 15%, а не 23—28%, как это рекомендуется многими, в том числе и авторами реферируемой статьи.

(AIEE Transactions, стр. 1473, т. 69, 1950, J. C. Little и др.)

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ

◇ ◇ ◇

ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, РАБОТАЮЩИЕ НА ВУЛКАНИЧЕСКОМ ПАРЕ

В журнале «Электричество» № 10, стр. 84, 1951, уже сообщалось об электростанциях, работающих на вулканическом паре, или, как их называют, геотермических электростанциях, эксплуатируемых в Италии, и станции, строящейся в Исландии. В настоящее время Ново-Зеландский парламент принял закон о постройке такой геотермической электростанции в Новой Зеландии, близ Вейрекей. Здесь уже пробурено 14 скважин и производится бурение еще ряда скважин на глубину 150...300 *м*, т. е. до разведанного парового горизонта. Общая мощность станции будет 20 000 *квт*, стоимость — примерно 1 000 000 фунтов стерлингов. Предполагают, что общая мощность геотермических станций близ Вейрекей может быть больше, чем в Ларда-релло (Южная Италия), т. е. более 150 000 *квт*.

(El. Times, № 3175, 11 сент., стр. 452, 1952)

Инж. Б. А. ПРОТОПОПОВ

НОМОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЗУБЦОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В технической литературе опубликовано много способов упрощенного расчета магнитного напряжения зубцов электрических машин с учетом магнитного потока, замыкающегося параллельно зубцам через пазы (воздушный шунт). Эти способы делятся на три основные группы: а) способы, основанные на подразделении зубца по высоте на ряд слоев, для каждого из которых определяется магнитное напряжение с последующим их суммированием; б) приближенные способы для первоначального расчета, основанные на принятии среднего магнитного напряжения на единицу высоты зубца, исходя из отношения максимальной ширины зубца к минимальной и из максимального значения индукции в зубце, с помощью кривых или таблиц; воздушный шунт учитывают в виде некоторой постоянной или же им пренебрегают; в) расчетные способы, в которых опытная кривая намагничивания приближенно выражается аналитической функцией.

В учебной литературе и в заводской практике обычно применяют способ, относящийся к первой группе и основанный на соотношении

$$B'_z = B_z + k_z \cdot H, \qquad (1)$$

где B'_z — условная индукция в зубце, *гс*;
B_z — действительная индукция в зубце, *гс*;
H — напряженность магнитного поля, *а/см*;

$$k_z = \frac{0{,}4\pi}{k_c}\left(\frac{b_n}{b_z} + 1 - k_c\right)h_z, \qquad (1а)$$

где k_c — коэффициент заполнения стали;
b_n — ширина паза, *см*;
b_z — ширина зубца, *см*;
h_z — высота слоя в радиальном направлении, *см*.
Если принять $k_c = 0{,}92$ и $h_z = 1$ *см*, то

$$k_z = 1{,}37\left(\frac{b_n}{b_z} + 0{,}08\right).$$

В большинстве практических случаев можно с достаточной точностью считать:

$$k_z = 1{,}45\,\frac{b_n}{b_z}. \qquad (1б)$$

Исходя из уравнения (1), можно, используя кривую намагничивания стали, известным способом определить действительную индукцию и магнитное напряжение для соответствующего слоя, основываясь на известных значениях B'_z и k_z. При всей наглядности этого способа он все же является несколько кропотливым.

Значительно быстрее приводит к цели использование специальной номограммы, позволяющей с достаточной для практических расчетов точностью определить значения H и B_z, исходя из B'_z и k_z. Описываемая номограмма, также основывающаяся на уравнении (1), имеет три оси: прямолинейные и параллельные оси α и β и криволинейную ось γ. Не вдаваясь в подробности обоснования номограммы, укажем способ ее построения и применения:

1. По вертикальной оси α откладываем значения k_z в *гс·см/а*. Практически отношение $\frac{b_n}{b_z}$ не превышает 4; следовательно, откладываем k_z в пределах от 0 до 1,45·4, т. е. до 6. В качестве масштаба для оси α выбираем, например, $m_\alpha = 4$ *см/гс·см/а*.

2. По вертикальной оси β, расположенной на расстоянии b от оси α и параллельно последней, откладываем значения условной индукции $B'_z = \frac{t}{k_c \cdot b_z} B_\delta$ (t — зубцовое деление, B_δ — максимальное значение индукции в воздушном зазоре) в пределах от 18 000 до 35 000 *гс*. Масштаб выбираем, например, $m = 8 \cdot 10^{-4}$ *см/гс*. Для большего удобства пользования номограммой целесообразно начало оси β сместить вниз относительно начала оси α, т. е. применить косоугольную систему координат. Для простоты можно, например, выбрать угол между осями ординат и абсцисс равным $90 + 45 = 135°$.

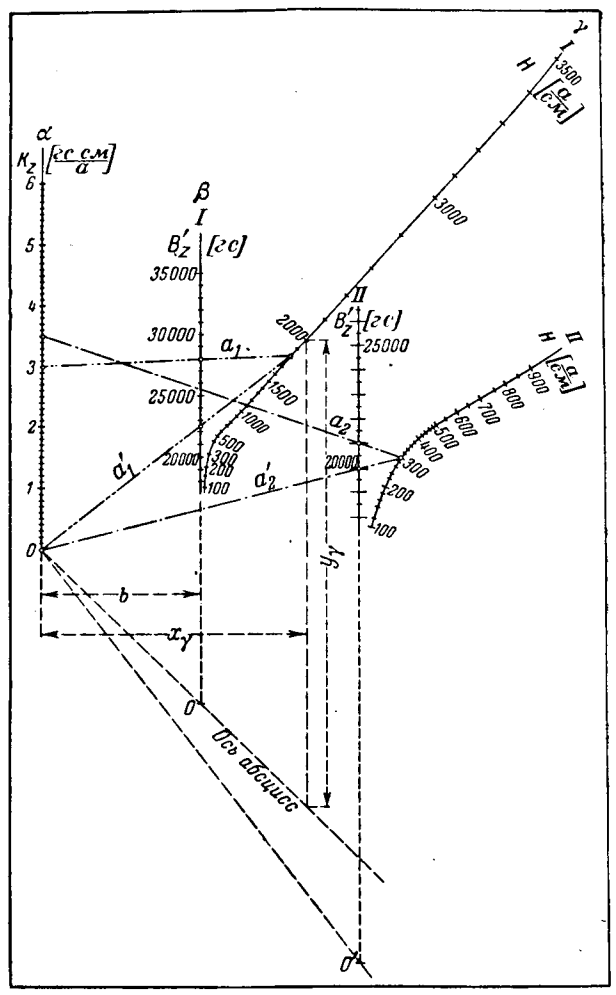


Рис. 1. Номограмма для расчета магнитного напряжения зубцов электрических машин.

3. Строим по точкам криволинейную ось γ, по которой откладываем значения H в $a/см$. Координаты отдельных точек этой кривой находим из следующих уравнений:

$$x_\gamma = \frac{b}{1 - m_\gamma \cdot H}; \qquad (2а)$$

$$y_\gamma = \frac{m \cdot B_z}{1 - m_\gamma \cdot H}, \qquad (2б)$$

где x_γ — абсцисса данной точки оси γ, откладываемая перпендикулярно оси α;

y_γ — ордината данной точки оси γ, откладываемая параллельно осям α и β от косой оси абсцисс.

Масштаб для оси γ выбираем, исходя из условия $m_\gamma = \frac{m}{m_a}$. В нашем примере $m_\gamma = \frac{8 \cdot 10^{-4}}{4} = 2 \cdot 10^{-4}$ $см/а$.

Для каждой пары координат $[x_\gamma; y_\gamma]$ в уравнения (2а) и (2б) необходимо подставлять соответствующие друг другу значения B_z и H, связанные между собой кривой намагничивания $B_z = f(H)$.

В таблице показан расчет координат x_γ и y_γ для трех точек по уравнениям (2а) и (2б) при расстоянии между осями α и β, равной $b = 10$ $см$ (сталь электротехническая Э1А, Э1АА и Э2А).

H, $а/см$	$m_\gamma \cdot H$	x_γ, $см$	B_z, $гс$	$m \cdot B_z$	y_γ, $см$
300	0,06	10,64	19 920	15,98	17,00
1 000	0,20	12,50	21 450	17,19	21,46
2 000	0,40	16,68*	22 700	18,19	30,30*

* Эта точка обозначена на рисунке x_γ и y_γ.

В правой части рисунка приведена нижняя часть номограммы в увеличенном масштабе с $b = 20$ $см$ и с еще более опущенным началом оси β. Соответствующие друг другу оси β и γ обозначены $I - I$ и $II - II$.

Пользование номограммой

Вычисляем:

$$k_z = 1{,}45 \frac{b_n}{b_z},$$

где b_n — ширина паза;

b_z — ширина зубца на данном диаметре.

Вычисляем соответствующую условную индукцию

$$B'_z = \frac{t}{k_c b_z} B_\delta,$$

где t — зубцовое деление;

k_c — коэффициент заполнения стали;

B_δ — максимальное значение индукции в воздушном зазоре, $гс$.

Для вычисленных значений k_z и B'_z, соединяемых на номограмме прямой, определяем значение H. Соединяя последнее прямой с точкой $k_z = 0$, находим действительную индукцию в зубце B_z.

Пользование номограммой пояснено на рисунке двумя примерами. Для $k_z = 3{,}0$ и $B'_z = 28\,000$ $гс$ наносим прямую a_1 и получаем $H = 1\,820$ $а/см$. Действительное значение индукции определяем с помощью прямой a'_1 для $k_z = 0$ и для найденного значения H, как $B_z = 22\,500$ $гс$. Проверяем эти результаты путем подстановки в уравнение (1) и находим: $28\,000 \approx 22\,500 + 3{,}0 \cdot 1\,820$. Точно так же прямая a_2 для $k_z = 3{,}5$ и $B'_z = 21\,000$ $гс$ дает $H = 300$ $а/см$ и B_z в 19 970 $гс$. Контроль $21\,000 \approx 19\,970 + 3{,}5 \cdot 300$.

Естественно, что в номограмме, предназначенной для практического использования и приведенной на 3 стр. обложки, отсутствуют показанные на рисунке штрих-пунктирные вспомогательные прямые и узловые точки на осях.

(E. u. M. № 15/16, стр. 348, 1952, H. Mayer)

Инж. А. Г. КРАЙЗ

◇ ◇ ◇

Хроника

Совещание по использованию ветра

9 января 1953 г. закончилась работа первого координационного совещания при Энергетическом институте Академии наук СССР по вопросу использования энергии ветра в народном хозяйстве.

На совещании присутствовали представители академий наук союзных республик и филиалов Академии наук СССР, а также представители от научных и конструкторских организаций министерств и ведомств.

Целью совещания являлась координация научно-исследовательских и опытных работ в области использования энергии ветра для механизации и электрификации сельского хозяйства.

Открывший совещание акад. А. В. Винтер в своем докладе подвел итоги работы по использованию ветра, отметив большой вклад советских ученых и конструкторов в создание высококачественных конструкций ветродвигателей, в разработку теории ветродвигателей и в составление руководств по теории, строительству и эксплуатации ветросиловых установок. Дальнейшую работу в области использования энергии ветра, — указал А. В. Винтер, — нужно строить, исходя из задач, поставленных XIX съездом партии в отношении широкого развертывания механизации трудоемких работ в животноводстве, овощеводстве, садоводстве, а также работ по орошению, осушению заболоченных угодий и освоению новых земель. Решение этих задач требует расширения энергетической базы сельскохозяйственного производства. В связи с этим большое значение приобретает использование местных энергетических ресурсов, в том числе и энергии ветра.

Докладчик особое внимание обратил на возможность использования ветра для освоения полупустынных районов. Например, для некоторых районов Туркменской республики характерна рассредоточенность потребителей энергии, удаленность их от источников централизованного энергоснабжения. В этих условиях особое значение приобретает задача создания местной «оазисной» энергетики на базе использования энергии ветра и солнца.

Ветродвигатели могут быть успешно применены: для водоснабжения отгонного животноводства, для механизации и электрификации опорных пунктов колхозов и совхозов, для орошения, осушения заболоченных и рассолонения плодородных засоленных земель.

Ветродвигатели могут найти самое широкое применение в сельскохозяйственном производстве.

Чтобы достичь в использовании ветродвигателей в народном хозяйстве ощутимых экономических показателей, необходимо проделать большую работу по их производству и по внедрению в народное хозяйство, а также по подготовке соответствующих кадров. Необходимо провести большие научно-исследовательские работы.

В порядке самокритики докладчик, отметил, что до последнего времени Академия наук СССР не занималась использованием энергии ветра и не руководила научно-исследовательскими работами в этой области, проводившимися академическими институтами союзных республик. Научно-исследовательские институты занимаются использованием энергии ветра недостаточно, разрозненно, без общего согласованного плана. Важные научные работы до настоящего времени не доведены до конца.

Из выступлений было видно, что бывш. Министерство сельского хозяйства фактически не занималось внедрением ветродвигателей в сельское хозяйство. Только 20% действующих в настоящее время в колхозах ветроустановок являются современными, остальные же представляют собой старые ветряные мельницы.

Все выступавшие представители с мест и докладчики говорили о насущной необходимости использования ветродвигателей в сельском хозяйстве союзных республик.

На совещании было заслушано 12 докладов по различным вопросам ветроиспользования, в том числе П. А. Летунова, В. Т. Полторацкого и доктора техн. наук Г. А. Гриневича.

Доктор техн. наук, проф. Г. Х. Сабинин и научный сотрудник филиала ЦАГИ К. П. Вашкевич доложили о серии маломощных ветроэлектростанций ЦАГИ и о результатах исследований работы ветроэлектростанции мощностью в 25 *квт* с ветродвигателем ЦАГИ 1-Д-18. О результатах эксплуатации ветроэлектростанции ЦАГИ 1-Д-18 сообщил научный сотрудник Академии Казахской ССР К. М. Мирзокеев.

Были также заслушаны доклады о работе ветроэлектрических станций в системе соизмеримой мощности (старший научный сотрудник ВИЭСХ В. Н. Андрианов), о перспективах использования энергии ветра для малой нефтедобычи (научный сотрудник Энергетического института, Азербайджанской ССР К. Х. Сафаров), о преобразовании энергии ветра в тепло (научный сотрудник Энергетического института Академии наук СССР Б. А. Протопопов) и ряд других докладов.

В результате четырехдневной работы совещание разработало и приняло резолюцию, в которой установило основные направления научно-исследовательской работы по ветроиспользованию в пятой пятилетке, а также наметило те организации, которые должны заниматься решением отдельных задач. Для повседневной координации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ совещание сочло нужным рекомендовать создать комиссию при Энергетическом институте Академии наук СССР из представителей союзных республик, отраслевых научно-исследовательских институтов и различных министерств. Был намечен ряд практических мероприятий по производству ветросиловых установок и их внедрению, по подготовке кадров и обмену опытом работы.

Научные сотрудники ветроэнергетической группы Энергетического института Академии наук СССР

В. Т. ПОЛТОРАЦКИЙ и Б. А ПРОТОПОПОВ

✧ ✧ ✧

Профессор Е. В. Китаев

(К 70-летию со дня рождения)

Исполнилось 70 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора Евгения Васильевича Китаева. Имя этого крупнейшего советского ученого широко известно связистам нашей страны: с его именем непосредственно связано развитие телефонной техники, применяемой для городской и сельской связи во всех районах необъятной нашей Родины.

Е. В. Китаев родился в Петербурге. Среднее образование получил в одном из Петербургских реальных училищ, а высшее — в электротехническом институте [ныне Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)], который он окончил по первому разряду в 1909 г.

Вскоре после окончания института Е. В. Китаев получил назначение на должность главного механика в управление Харьковского почтово-телеграфного округа. Помимо своей повседневной административно-технической работы Евгений Васильевич в период 1910—1912 гг. участвовал в работах по проектированию и переустройству линейных сооружений Харьковской городской телефонной сети.

В октябре 1912 г. Е. В. Китаев был назначен начальником телефонной станции города Ревеля (ныне Таллин), а в 1914 г. Евгений Васильевич руководил прокладкой первого в России пупинизированного подводного кабеля Ревель—Гельсингфорс.

В марте 1916 г. Е. В. Китаев был назначен главным механиком управления Смоленского почтово-телеграфного округа, где организовал курсы по подготовке техников для телеграфно-телефонной связи. После Великой Октябрьской социалистической революции Евгений Васильевич продолжал работать в Смоленском управлении связи и был членом коллегии Наркомата связи Белорусской ССР.

В 1922 г. Е. В. Китаев был вызван в Москву и назначен начальником Технического отдела Телефонных предприятий НКП и Т. В это время Евгений Васильевич принимал активное участие в окончании восстановления разрушенного телефонного хозяйства в Москве. В 1930 —1931 гг. он заведывал телефонной лабораторией Научно-исследовательского института связи.

Педагогическая работа Е. В. Китаева началась с 1916 г. Сначала он преподавал электротехнику на курсах техников связи, а затем с 1920 г. — в Смоленском политехническом институте и был помощником ректора по учебной части в этом институте.

С переездом в Москву Е. В. Китаев непрерывно ведет педагогическую работу сначала в Институте связи, а затем в МВТУ, Академии связи и в МИИС, где он заведывал кафедрой проводной связи. В 1935 г. ВАК утвердил Евгения Васильевича в звании профессора по этой кафедре, а в 1940 г. ему была присвоена ученая степень доктора технических наук без защиты диссертации.

В 1943 г. Евгений Васильевич был назначен заведующим кафедрой телефонии в Московском электротехническом институте связи, где и работает до настоящего времени.

В 1951 г. Евгению Васильевичу присвоено звание Государственного директора связи III ранга, а осенью того же года Указом Президиума Верховного Совета СССР за многолетнюю плодотворную научно-педагогическую работу Евгений Васильевич был награжден орденом Ленина. Е. В. Китаев — автор большого количества книг и статей по электротехнике и проводной связи.

За время своей научно-педагогической деятельности Евгений Васильевич воспитал и подготовил многочисленные кадры специалистов, среди которых многие занимают ведущее положение в области электрической связи.

Кандидат техн. наук В. А. НАДЕЖДИН
Кандидат техн. наук, доц. В. Н. КУЛЕШОВ

◇ ◇ ◇

Библиография

А. Е. АЛЕКСЕЕВ. ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ. Объем 41,44 п. л., 484 стр., ц. 20 руб. Трансжелдориздат, 1951. Книга допущена Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для институтов железнодорожного транспорта по специальности „Электрический транспорт".

Автор книги А. Е. Алексеев — пионер советского тягового электромашиностроения и крупный специалист в области проектирования электрических машин. Его новая книга «Тяговые электродвигатели» является полностью переработанным курсом одноименного названия, вышедшего в 1938 г.

Книга состоит из введения и семи глав. Материал расположен по главам в порядке, принятом при изложении курса «Тяговые электродвигатели» на лекциях и групповых занятиях в институте. В книге подробно изложен комплекс вопросов по условиям работы, проектирования и конструкции тяговых двигателей.

Введение содержит краткий исторический обзор, в котором четко устанавливается приоритет советского тягового электромашиностроения. Рассматриваются различные применения тяговых двигателей, конструктивные особенности выполнения, условия их работы и дается общая оценка работоспособности тяговых электродвигателей. Оцениваются перспективы развития советского тягового электромашиностроения.

В главе первой рассмотрены свойства тяговых электродвигателей постоянного тока. Расширены представления о рабочих характеристиках тяговых двигателей, изложены современные взгляды на процесс коммутации и даны конкретные рекомендации борьбы с искрообразованием на коллекторе. Далее даны разделы: особенности пуска в ход и регулирование скорости, работа тяговых двигателей в генераторном режиме и, наконец, проведено сравнение двигателей различных систем возбуждения с эксплуатационной точки зрения. В последнем разделе автор дает картину переходных процессов в силовых цепях электровоза при внезапных нарушениях режимов его работы и в связи с этим указывает на вероятные причины пробоя изоляции тяговых электродвигателей и аппаратуры.

В главе второй описаны тяговые электродвигатели переменного тока. Вначале рассмотрены общие свойства коллекторных двигателей однофазного тока, их конструкция и особенности коммутации. Затем дан анализ тяговых асинхронных двигателей многофазного тока и конденсаторных. Особое внимание при изложении раздела асинхронных электродвигателей переменного тока уделено их регулированию в условиях электрической тяги. Включение данного материала в курс весьма полезно, так как заостряет внимание читателя на перспективности электрической тяги на переменном токе с применением асинхронных двигателей и ставит вопрос о необходимости проведения научно-исследовательских работ в этой области.

В главе третьей рассмотрены основные конструктивные узлы тяговых электродвигателей: обмотки, основные части якорей, валы, магнитные станины и статоры, подшипники и зубчатая передача. Детальное изложение и хорошо подобранные иллюстрации создают полное впечатление о конструктивных особенностях тяговых электродвигателей, вполне достаточное для принятия правильных конструктивных решений.

В главе четвертой изложены вопросы вентиляции и нагрева тяговых двигателей. Глава является оригинальным трудом автора и имеет большую ценность для теории и практики электрических машин. В ней наряду с ясным изложением процессов нагрева даны и методы теплового расчета, приводящие к практически верным решениям.

В главах пятой, шестой и седьмой рассмотрено проектирование тяговых двигателей постоянного и переменного тока с изложением полного числового расчета.

Книга написана ясным простым языком. При изложении нового материала автор проявил большое чувство меры. Курс достаточно полно отражает современное состояние предмета и составлен на современном уровне науки.

Книга «Тяговые электродвигатели» дает не только общие представления о процессах, но учит тому, как использовать явления для создания конструкций тяговых двигателей с определенными свойствами и, что особенно важно, как решать инженерные задачи.

Являясь ценным трудом по проектированию электрических машин, книга по своей значимости далеко выходит за рамки учебного пособия.

Необходимо отметить и некоторые недостатки.

Не рассмотрены вопросы эксплуатации тяговых двигателей, их ремонта и испытания. Не освещен передовой опыт стахановцев электрических железных дорог и ремонтных заводов. Недостаточно уделено внимания изложению современных задач, стоящих перед конструкторами и эксплуатационниками.

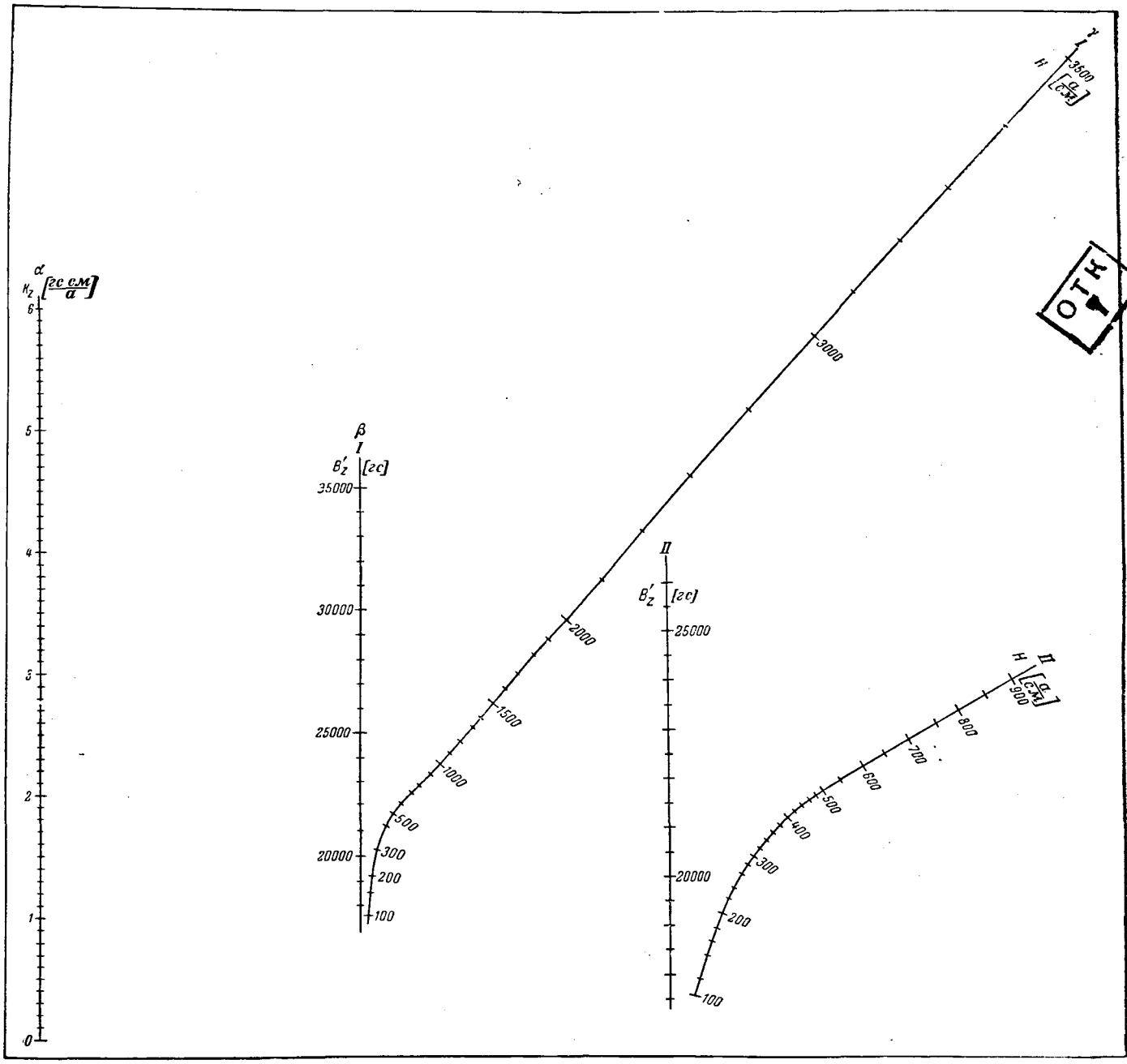
К сожалению, в книге встречаются досадные опечатки, наблюдаются пропуски в проставлении размерностей (в числовых примерах), не все рисунки снабжены необходимыми пояснениями (например, рис. 1,65, 1,66 и др.); отсутствует список литературы, нет алфавитного указателя.

Отмеченные недостатки не умаляют достоинств рецензируемого труда. По устранении их книга проф. А. Е. Алексеева «Тяговые электродвигатели» издания 1951 г. сможет служить образцом учебного пособия для высших технических учебных заведений.

Кандидат техн. наук, доц. Е. М. ПУХОВ
Кандидат техн. наук В. А. ГЛЕБОВ
Ростовский на-Дону институт инженеров железнодорожного транспорта

◇ ◇ ◇

Сдано в набор 21/III 1953 г. Подписано к печати 22/V 1953 г.
Объем 12 п. л. Уч.-изд. л. 16,5 Бумага 60×92¹/₈
Т-02962 Тираж 16 875 экз. Зак. 96

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

НОМОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЗУБЦОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.
Листовая электротехническая сталь марок Э1А, Э1АА и Э2А
(пользование номограммой—см. стр. 92—93 настоящего номера журнала)