ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1950

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

9

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

КОММУНИЗМ ЕСТЬ СОВЕТСКАЯ ВЛАСТЬ
ПЛЮС ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ВСЕЙ СТРАНЫ (Ленин)

ЖУРНАЛ ОСНОВАН в 1880 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

9
1950
СЕНТЯБРЬ

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

СОДЕРЖАНИЕ

Великая стройка сталинской эпохи 3
М. П. Костенко — Электродинамическая модель для исследования устойчивости 5
Г. А. Сисоян — Электрическая печь, как потребитель-регулятор энергосистемы 16
А. Д. Степанов — Тепловозостроение за 25 лет 23
Д. Б. Ломазов — Измерения максимальной разности потенциалов в рельсовых цепях электрического транспорта 31
Е. А. Лейбович — Несимметричное включение двух механически связанных асинхронных двигателей 37
А. В. Стукачев — О некоторых вопросах методики расчета импульсных генераторов напряжения 39
Е. С. Фрид — Расчет импульсных градиентов в многокатушечных трансформаторных обмотках 45
В. Т. Снагин — Взрывобезопасные штепсельные соединения для кабелей угольных шахт 51
И. И. Ратгауз — Масляные селеновые выпрямители 54
М. Ф. Карасев, В. А. Фалеев и **В. П. Убеев** — К вопросу существования инверсии электрических разрядов в установках с вибрирующими контактами 58
Э. И. Рассовский — Метод холостого хода и короткого замыкания в применении к графическому исследованию трехфазных цепей 60
В. Е. Боголюбов — Графический метод расчета переходных процессов в цепи со сталью с учетом гистерезиса 64
А. А. Ризкин — Об одном методе анализа переходных процессов в линейных четырехполюсниках 66
С. А. Гинзбург — Теорема о нелинейном четырехполюснике 68
М. С. Миренский — Измерение малой мощности переменного тока при помощи амперметра 74

ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

М. А. Шателен — Работы Б. С. Якоби в области электрических измерений 76

ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ 81

ДИСКУССИИ

Правила устройства электротехнических установок 82

ХРОНИКА

Конференция авторов журнала „Электричество" 92
Авторефераты диссертаций 94
О золотой медали им. А. С. Попова 94

БИБЛИОГРАФИЯ

Л. М. Вильчур — Книга Л. Е. Эбина и Ш. М. Алукера „Электрический расчет сетей с использованием земли в качестве одного из фазных проводов 95
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике 96
Обращение к авторам журнала „Электричество" 75

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

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**, академик **В. Ф. Миткевич**, канд. 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

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Великая стройка сталинской эпохи[1]

Мы живем в великую сталинскую эпоху, эпоху бурного трудового творчества миллионов, эпоху смелых дерзаний и великих свершений. Все прогрессивное человечество следит за трудовыми подвигами советского народа в послевоенные годы. С чувством восхищения миллионы людей во всех странах читают постановление Совета Министров СССР «О строительстве Куйбышевской гидроэлектростанции на реке Волге».

Куйбышевская гидроэлектростанция на Волге будет крупнейшей в мире. В постановлении Совета Министров СССР подчеркивается важное значение строительства Куйбышевской гидроэлектростанции, обеспечивающей снабжение электроэнергией промышленных предприятий гг. Москвы, Куйбышева, Саратова и электрификацию железных дорог, орошение земель Заволжья и улучшение судоходства на реке Волге. Мощность новой гидроэлектростанции составит около двух миллионов киловатт. Она будет вырабатывать около десяти миллиардов киловатт-часов в год.

Электроэнергия Куйбышевской гидроэлектростанции предназначается на важнейшие народнохозяйственные цели:

— Шесть миллиардов сто миллионов киловатт-часов ежегодно будет получать столица нашей Родины — Москва;

— Два миллиарда четыреста миллионов киловатт-часов в год будут получать районы городов Куйбышева и Саратова;

— Полтора миллиарда киловатт-часов пойдет на орошение земель Заволжья, что позволит осуществить орошение одного миллиона гектаров земель.

Строительство гигантской гидроэлектростанции начинается в 1950 году и будет завершено в невиданно короткий срок — в 1955 году станция должна вступить в действие на полную мощность. История еще не знала такого размаха строительных работ и таких темпов!

Перед нами знаменательный документ. Просмотрите номера газет, где опубликовано решение Советского правительства. Они ярко запечатлели сегодняшний день земного шара. Тяжелая лихорадка военной истерии трясет весь капиталистический мир. Гитлеровский лозунг «Пушки вместо масла», подновленный в Вашингтоне, экспортирован Соединенными Штатами в Западную Европу, где по «плану Маршалла» осуществляется чудовищное ограбление трудящихся. В Корее почти уже два месяца бушует пламя войны, развязанной американскими империалистами. Газеты сообщают о бандитских налетах американских захватчиков, бомбящих и обстреливающих мирные города и села. Во всех концах земного шара звучат гневные голоса протеста против американской интервенции в Корее, все настойчивее и решительнее повторяются требования прекратить американскую агрессию, вывести все иностранные войска, добиться мирного урегулирования корейского вопроса. Ширится и крепнет могучий фронт сторонников мира.

Именно в эти дни, в условиях, когда капиталистический мир охвачен военным психозом, советская печать опубликовала сообщение об историческом решении Советского правительства соорудить в кратчайший срок самую крупную гидроэлектростанцию в мире.

Там, в лагере империализма, реакционные правящие круги и их наемные прислужники кликушествуют в припадке военной истерии, грозят миру истреблением миллионов людей.

У нас — в стране социализма — великий советский народ занят мирным созидательным трудом и провозглашает новый грандиозный план строительства величайшего энергетического гидроузла на Волге — самой крупной из рек Европы.

Простое сопоставление этих фактов ярко выражает великие преимущества советского строя, его неизмеримое превосходство над раздираемым противоречиями капиталистическим строем. Проект сооружения грандиозной гидроэлектростанции на Волге — новое замечательное проявление творческого гения нашего народа, вдохновляемого великим Сталиным.

[1] Передовая газеты „Правда" № 235 (11707) от 23 августа 1950 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

На заре нашего социалистического государства, когда страна еще была охвачена разрухой, в голодной, холодной, погруженной во тьму Москве побывал известный английский писатель Герберт Уэлс. Он был принят Лениным и слушал вдохновенный рассказ Владимира Ильича о плане электрификации России, который готовило тогда Советское правительство. Вернувшись на родину, английский писатель с удивлением и скептическим недоверием писал о ленинском плане, хотя и слыл у своих соотечественников большим фантастом. Но ум его, ум человека, выросшего в капиталистическом мире, оказался не в состоянии объять все величие большевистской идеи. И то, что было уже подсчитано и запечатлено на страницах плана электрификации, показалось ему неосуществимой утопией.

Мы живем в счастливые дни великого торжества ленинско-сталинских идей. План электрификации страны, разработанный В. И. Лениным и И. В. Сталиным, давно уже воплощен в жизнь. Под руководством великого Сталина советские люди в годы пятилеток совершили беспримерный подвиг, превратив свою страну из отсталой, крестьянской в могучую индустриально-колхозную социалистическую державу. То, о чем мечтал Ленин, что Сталин начертал на страницах пятилеток, советский народ под руководством большевистской партии воплотил в жизнь. Вслед за первенцем электрификации Волховстроем зашумела турбина гигантского Днепрогэса, и вместе с ними дали ток машины сотен и тысяч больших и малых электростанций, покрывших всю нашу страну.

Подводя итоги первой пятилетки, товарищ Сталин говорил в 1933 году:

«В смысле производства электрической энергии мы стояли на самом последнем месте. Теперь мы выдвинулись на одно из первых мест».

За годы сталинских пятилеток дело электрификации страны увенчалось новыми выдающимися успехами. Электрическая энергия широко внедряется во все отрасли народного хозяйства. Электричество, осветившее много лет назад первыми «лампочками Ильича» крестьянские избы, теперь применяется в колхозном производстве, входит в быт колхозной деревни. Над опытными полями уже протянулись нити проводов, и электротракторы пашут землю, прокладывая новые пути к улучшению условий и повышению производительности труда работников сельского хозяйства.

Всемирно-исторические победы коммунистического строительства в СССР — результат гигантской организаторской работы партии Ленина—Сталина, сплачивающей массы на самоотверженный творческий труд. Товарищ Сталин учит, что реальность наших планов — это живая и практическая деятельность миллионов людей, это — миллионы трудящихся, творящие новую жизнь.

Сталинская вера в неиссякаемые творческие силы советского народа, в его самоотверженность, инициативу, в его верность делу коммунизма позволяла и позволяет большевистской партии ставить перед страной такие гигантские по своему размаху задачи, которые немыслимы и неосуществимы в условиях капиталистического строя.

Под мудрым руководством товарища Сталина советские люди, поражавшие в годы Отечественной войны весь мир своими непревзойденными военными подвигами, ныне являют пример массового трудового героизма в строительстве коммунистического общества.

Величественная послевоенная пятилетка, план преобразования природы, постановление Совета Министров СССР о переходе на новую систему орошения и постановление «О строительстве Куйбышевской гидроэлектростанции на реке Волге» — все это планы поистине большевистского размаха! Претворение в жизнь таких планов под силу только великому народу, строящему коммунизм. В наших планах запечатлены великолепные черты сталинской эпохи — гигантский размах и высокие темпы развития, глубокое научное обоснование великих преобразований и творческая деятельность миллионов. Великая цель строительства коммунизма рождает великую энергию.

Сталинский план грандиозной стройки на Волге вселяет в сердца советских людей чувство законной гордости за нашу великую Родину, идущую по пути к коммунизму!

✧ ✧ ✧

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Электродинамическая модель для исследования устойчивости[1]

Член-корр. АН СССР, проф. М. П. КОСТЕНКО

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Исследование статической и динамической устойчивости параллельной работы сложных энергосистем и длинных линий электропередачи энергии математическим путем представляет значительные трудности, поэтому применение в этих случаях методов физического моделирования имеет большое значение. Расчеты и экспериментальные исследования с помощью указанных методов, проведенные под руководством автора, показали осуществимость с большой точностью на лабораторных моделях вращающихся электрических машин всех необходимых параметров и характеристик, имеющих такие же относительные значения, как и для мощных машин-оригиналов. Показана возможность создания достаточно простых, гибких и точных лабораторных моделей энергетических систем для исследования их статической и динамической устойчивости, динамических перенапряжений и т. п.

Исследование статической и динамической устойчивости параллельной работы длинных линий передачи энергии и сложных энергосистем, в которые входит значительное число электрических станций, представляет одну из весьма трудных задач, требующих сложных аналитических или экспериментальных приемов. Для облегчения расчетов приходится производить преобразование системы многих электростанций к возможно малому их числу, причем достаточно точный анализ можно производить практически при сведении энергосистемы к двум эквивалентным электростанциям. Вследствие большой сложности и громоздкости математических расчетов приходится прибегать к допущениям, облегчающим расчетный математический аппарат, но приводящим к некоторым искажениям действительного процесса.

Весьма значительные осложнения при расчетах устойчивости вносит учет поведения приемников в виде асинхронных двигателей, ртутных выпрямителей с обратной э. д. с. в цепи выпрямленного тока и т. п.

Изучение сложного явления устойчивости электрических систем может производиться как с помощью счетно-решающих устройств, построенных на методе математических аналогий (механические и электрические интеграторы), так и с помощью физического моделирования [Л. 1, 2, 4, 9], построенного на принципе изучения поведения электродинамических моделей машин, аппаратов и цепей, воспроизводящих в уменьшенном масштабе характеристики и свойства оригиналов систем, подлежащих изучению.

Нужно отметить, что счетно-решающие устройства, построенные на методе математического моделирования, требуют составления системы всех тех дифференциальных уравнений, которые описывают изучаемое явление, поэтому, чем более сложный и многообразный процесс подвергается изучению, тем более громоздкой становится и математическая аналогия, которая должна отразить эти явления на устройстве, имеющем в сравнении с оригиналом иную физическую природу.

При изучении явления устойчивости на *электродинамических моделях* в ряде случаев нет необходимости описывать все стороны происходящих явлений в виде системы математических уравнений, а достаточно соблюсти лишь количественное совпадение тех относительных параметров, которые влияют на процессы, происходящие в системе, так как в этом случае поведения оригинала и модели будут идентичными не только в основной части процесса, но также и в других его сторонах и деталях.

При изучении вопроса о моделировании устойчивости параллельной работы можно решать задачу экспериментального исследования двояким способом:

1) Можно выполнить для данной изучаемой системы специально рассчитанные неизменяемые модели, у которых их относительные параметры будут соответствовать элементам этой системы. Такой способ может быть приемлемым при проектировании или изучении поведения какой-либо очень крупной системы, обладающей специфическими свойствами, когда выполнение специальных моделей может явиться вполне оправданным. Примером подобной системы является специальная электродинамическая модель, созданная В. Ивановым, В. Толвинским, С. Гохбергом и др. при разработке проекта электропередачи Куйбышев — Москва, на которой были проведены исследования статической устойчивости проектируемой системы при наличии сериесной компенсации [Л. 2, 7].

---

[1] Доклад на объединенном заседании электротехнической и электромеханической секций Научно-технической конференции ЛПИ в апреле 1950 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

2) Для целого ряда других систем с более типичными параметрами указанный путь является слишком сложным, длительным и дорогим. Для изучения вопросов устойчивости таких систем достаточно иметь особую лабораторию по моделированию, в которой можно было бы изменять в достаточно широких пределах параметры входящих в нее моделей машин, которые могли бы обеспечить покрытие диапазона изменения относительных параметров, соответствующих практически возможным случаям. Такая лаборатория для моделирования устойчивости параллельной работы должна иметь набор специально рассчитанных машин: генераторов, возбудителей, трансформаторов, двигателей, катушек самоиндукции и т. п. Это должно сделать возможным изучение вопросов устойчивости как одной станции относительно системы бесконечной мощности, так и двух или нескольких станций при их параллельной работе. В подобной лаборатории подбор относительных параметров должен выполняться без особых конструктивно-производственных переделок машин, лишь путем регулировки и подбора их параметров, а также посредством комбинирования отдельных специально подобранных элементов и частей машин. Лаборатория моделирования устойчивости параллельной работы должна предоставлять возможность решать вопросы устойчивости различных систем принципиально таким же путем, как это выполняется на расчетных столах. В этом случае быстрые и достаточно надежные ответы могут заметно ускорить процесс проектирования систем и анализ ряда сравниваемых вариантов выполнения системы и возможных режимов ее работы с точки зрения устойчивости.

Нужно отметить, что выполнение специальных моделей для каждой данной энергосистемы (т. е. по способу 1) является не только весьма дорогим способом исследования, но для своего осуществления он требует весьма значительного времени как для проектирования самих моделей, так и для выполнения их на машиностроительном заводе или в специальной опытной мастерской. Нужно при этом отметить, что для самого проектирования моделей уже должны быть предварительно известны контуры той системы, устойчивость которой должна изучаться.

Основными параметрами, имеющими значение при изучении вопросов устойчивости, являются:

1) Синхронные реактивные сопротивления по продольной и поперечной осям x_d и x_q.

2) Переходные реактивные сопротивления по тем же осям x'_d и x'_q.

3) Сопротивления рассеяния статорной и роторной цепей x_s и x_f.

4) Реактивное сопротивление обратной последовательности x_2.

5) Полное реактивное сопротивление роторной цепи $X_f = x_{ad} + r_f$.

6) Активное сопротивление якорной системы r_a и системы возбуждения r_f.

7) Инерционные постоянные станций преобразованной системы H_j.

8) Постоянные времени статорной и роторной цепей T_{d0}, T'_d, T''_d и T_a.

9) Параметры электрических цепей и нагрузок.

10) Характеристика первичных двигателей.

Подбор указанных относительных параметров на моделях малой мощности встречает при своем осуществлении ряд существенных затруднений, которые могут быть преодолены только специальными методами, применявшимися до сих пор лишь в ограниченных масштабах. Основные затруднения при подборе на машинах малой мощности параметров, соответствующих машинам большой мощности, заключаются в том, что при точном сохранении геометрического подобия с постепенно уменьшающимися линейными размерами относительные параметры машин, чрезвычайно существенные с точки зрения изучения вопросов устойчивости, не остаются постоянными, а изменяются, и при этом законы изменения этих параметров получаются весьма различными.

Рассмотрим по отдельности законы изменения указанных выше параметров при наличии полного геометрического подобия машин и установим те основные методы, которые позволяют сохранять эти параметры неизменными при сохранении закона геометрического подобия. Закон изменения относительных значений активных и реактивных сопротивлений ряда электрических машин и трансформаторов с постепенно изменяющимися линейными размерами, при сохранении их точного геометрического подобия, хорошо выявляется на примере трансформаторов.

Если взять серию однотипных трансформаторов с неизменными числами витков обмоток, то при возрастании линейного размера в k раз сечения активной меди и стали увеличатся в k^2 раз, а их объемы в k^3 раз. Если сохранять при этом индукции в стали B и плотности тока j в обмотках, то номинальный ток и магнитный поток и э. д. с. возрастут в k^2 раз, потери в стали и меди возрастут в k^3 раз, а габаритная мощность P возрастет в k^4 раз. Отсюда следует, что относительные потери в стали и меди и относительная величина активного сопротивления изменяются обратно пропорционально k или обратно пропорционально $\sqrt{P}$. Так как расстояния между первичной и вторичной обмотками и высота обмотки возрастают пропорционально линейному размеру k, то магнитная проводимость путей рассеяния на 1 *см* длины витка остается неизменной, а так как длина витка возрастает пропорционально k, то абсолютное реактивное сопротивление возрастает в k раз, но так как при принятых выше условиях отношение $\frac{I_N}{U_N} = \text{const}$, то и относительное реактивное сопротивление возрастает в том же отношении. Соответственным образом абсолютный намагничивающий ток изменяется пропорционально k, а относительный намагничивающий ток — обратно пропорционально k.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Формулированные выше положения об изменении относительных активных и реактивных сопротивлений при изменении линейных размеров имеют место, как показывает теория и практика динамостроения, не только при моделировании трансформаторов, но и вращающихся электрических машин и прежде всего в синхронных машинах с явно и неявно выраженными полюсами, если при изменении линейных размеров также сохранять плотности тока в обмотках и индукции в стали и изменять соответственно линейные нагрузки пропорционально k. Нужно отметить, что если при изменении линейных и диаметрального размеров происходит изменение чисел полюсов при сохранении величины полюсного деления и активной длины машины, то в этом случае уже нарушается критерий подобия и относительные активные и рективные сопротивления остаются неизменными. При этом нужно отметить, что реактивное сопротивление реакции якоря

$$x_{ad} = \frac{A}{B_\delta} \cdot \frac{\tau}{\delta},$$

а реактивное сопротивление рассеяния пазовой части

$$x_{ns} = \frac{A}{B_\delta} \cdot \frac{h}{bq}$$

и лобовой части

$$x_{ls} = \frac{A}{B_\delta} \cdot \frac{\tau}{l};$$

здесь A — линейная нагрузка на 1 *см*;
B_δ — индукция в воздушном зазоре;
h — высота паза;
b — его ширина;
q — число пазов на полюс и фазу.

Для синхронных машин имеет значение для устойчивости параллельной работы еще инерционная постоянная H_j, пропорциональная маховому моменту GD^2, квадрату скорости вращения и обратно пропорциональная мощности P. При одинаковом изменении всех линейных размеров при $p = \text{const}$ H_j оказывается пропорциональной k.

Формулированные выше закономерности для изменения относительных активных и реактивных сопротивлений и инерционных постоянных дают возможность установить *рекомендации для моделирования* электрических машин большой мощности в виде лабораторных машин малой мощности для изучения на них вопросов устойчивости. Обычно лабораторные синхронные машины выполняются с числом полюсов $2p = 6$, поэтому при моделировании крупных тихоходных многополюсных машин и быстроходных двухполюсных или четырехполюсных машин приходится производить не только сравнение параметров по принципу изменения габаритов машины и мощности машин, но одновременно и при изменении числа ее полюсов. Для того, чтобы при моделировании не происходило одновременного изменения типа выполнения полюсной системы, можно рекомендовать выбор для неявнополюсных турбогенераторов в качестве модели машины типа асинхронного двигателя, имеющего также неявнополюсное выполнение, а для явнополюсных машин рекомендуется брать соответственно явнополюсные модели.

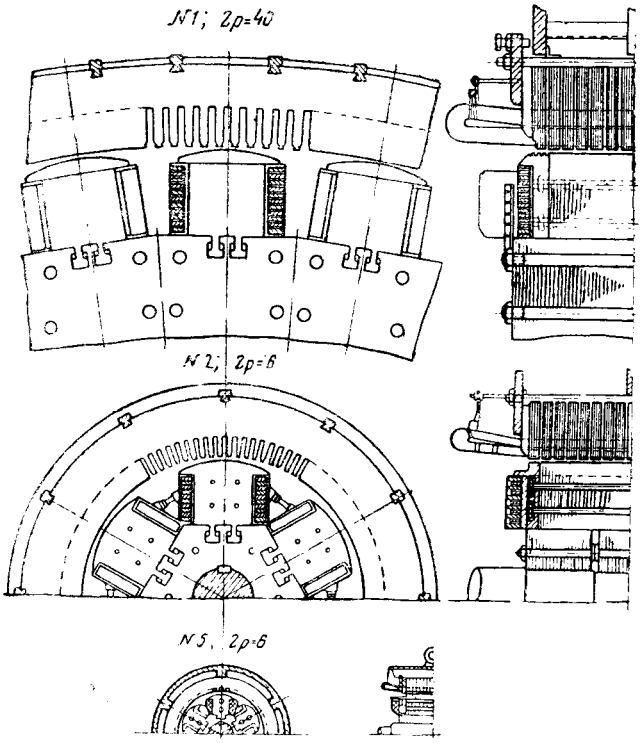

Рис. 1. Преобразование многополюсной синхронной машины в модель с малым числом полюсов.

Рассмотрим случай моделирования многополюсной и двухполюсной синхронной машины с явновыраженными полюсами в виде шестиполюсной лабораторной явнополюсной машины, для чего произведем сравнение данных и параметров следующих реальных машин: многополюсных синхронных генераторов с $2p = 40$, $2p = 6$ и $2p = 2$, имеющих приблизительно одинаковое полюсное деление и активную длину, и шестиполюсного синхронного генератора, имеющего эти величины приблизительно в 4 раза меньше. Сравнительные данные этих машин представлены в табл. 1, а сравнительные поперечные и продольные их разрезы для № 1, 2 и 5 на рис. 1. Сравнение машин № 1 и 2, имеющих разное число полюсов, но одинаковые полюсные деления и активную длину, подтверждает вышеприведенное положение, что такие машины имеют практически одинаковые относительные активные и реактивные сопротивления. При этом нужно отметить, что отступления практических данных от теоретических объясняются соответствующими отступлениями практических данных от вышеуказанных законов точного подобия при изменении геометрии машин. Сравнение машин № 2, 4 и 5 с равными числами полюсов $2p = 6$, но имеющих пропорционально измененные размеры, показывает, что, как указывалось выше, их относительные активные сопротивления должны изменяться обратно пропорционально линейному

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 1

№	Тип синхронной машины	$2p$	P, ква	Мощность исходного генератора, ква	U_N, в	I_N, а	η, %	$\frac{p_м + p_{ст}}{P \cos\varphi}$, %	τ, см	l, см	δ, мм	B_{δ_1}, гс	A а/см	H_j генератор/агрегат, сек	x_d	x_d'	x_s	r_s	x_f	r_a	r_f	T_{do}, сек	T_d', сек	T_a сек
		Данные синхронных генераторов-оригиналов																						
1	Гидрогенератор с продольной демпферной обмоткой	40	27 000	—	10 500	1 485	96,9	2,2	54,2	75	13	8 750	543	9,1	1,14	0,29	0,435	0,129	0,19	0,0038	0,00075	5,1	1,56	0,35
2	Синхронный генератор с полной демпферной обмоткой	6	5 000	—	6 000	482	95,8	3,2	62,8	85	15	6 000	550	2,38	1,3	0,25	0,17	0,10	0,177	0,007	0,0013	3,6	0,7	0,08
3	Турбогенератор	2	1 250	—	525	1 372	93,6	4,8	78	75	11	6 900	302	3,94	1,46	0,193	0,15	0,08	0,078	0,0069	0,00173	3,1	0,41	0,069
4	Синхронный генератор без демпферной обмотки	6	100	—	230	251	90,7	9,5	21,2	24	1,8	7 400	325	0,575	1,77	0,231	0,49	0,11	0,13	0,03	0,005	1,14	0,148	0,052
5	Синхронный генератор без демпферной обмотки	6	25	—	230	63	86,5	14,3	15,7	18	1,0	7 000	193	0,406	1,42	0,143	0,295	0,059	0,09	0,0425	0,007	1,18	0,119	0,021
		Данные синхронных генераторов электродинамической модели																						
6	Явнополюсный синхронный генератор без демпферной обмотки (С-25), Проект	6	25	140	230	63	88,5	8,5	24	14	2,2	5 350	131	3,1 / (3,85)	0,93	0,11	0,24	0,069	0,05	0,0068	0,003	0,96	0,11	0,11
7	Явнополюсный синхронный генератор (С-18,75) со съемной демпферной обмоткой. В скобках даны параметры при включенной демпферной обмотке Получен переконструированием № 4	6	18,75	80	230	47	85,4	11,8	21,2	19	1,8	4 600	120	2,5 / (3,2)	0,949	0,124	0,25 (0,089)	0,059	0,071	0,0172	0,0041	0,74 (0,0079)	0,10	0,046 (0,0165)
8	Неявнополюсный синхронный генератор (СТ-12,5), тип турбогенератора	6	12,5	45	230	31,5	86,2	11,5	17,3	19,5	0,85	5 600	98,5	2,35 / (2,97)	1,77	0,122	0,053	0,034	0,05	0,0172	0,0058	0,8	0,55	0,01
9	Явнополюсный синхронный генератор без демпферной обмотки (С-12,5)	6	12,5	45	230	31,5	86,7	10,9	17,3	19,5	1,0	5 760	88	2,35 / (2,97)	0,901	0,091	0,205	0,041	0,0515	0,0148	0,0027	1,07	0,108	0,044
10	Явнополюсный синхронный генератор без демпферной обмотки (С-6,25), получен переконструированием [redacted]	6	[redacted]	25	[redacted]	15,7	[redacted]	12	15,7	18	1,0	4 160	84	1,82 / (2,87)	0,926	0,095	0,205	0,046	0,065	0,0142	0,0057	0,83	0,085	0,041

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

размеру k, а их реактивные сопротивления и инерционные постоянные — прямо пропорционально k.

Отсюда следует, что вполне возможно производить моделирование по принципу подобия не только при равных, но и при различных числах полюсов, но в последнем случае критерий изменения размеров нужно относить уже не к диаметру, а к полюсному делению машины.

При рассмотрении параметров шестиполюсной машины малой мощности по сравнению с реальными мощными машинами многополюсными с $2p=40$, $2p=6$ и двухполюсной машиной (табл. 1) можно видеть, что машина малой мощности имеет увеличенное значение относительного активного сопротивления и уменьшенные значения реактивных сопротивлений x_s и x'_d. Наоборот, синхронное реактивное сопротивление x_d имеет повышенное значение из-за того, что ее воздушный зазор δ уменьшен не пропорционально изменению полюсного деления τ, а значительно больше. Однако при моделировании машин большой мощности в виде машины малой мощности необходимое значение синхронного реактивного сопротивления может быть получено без затруднений подбором отношения $\frac{A}{B\delta}$ посредством надлежащего изменения отношений базисных значений напряжения и тока. Реактивные сопротивления, зависящие в основном от рассеяния статорных и роторных цепей x_s, x_f, x'_d и x_2 в машине малого габарита получают принципиально уменьшенные значения, но это обстоятельство является благоприятным фактором, так как подбор необходимых значений этих сопротивлений может быть легко получен включением в соответствующие цепи дополнительных реактивных сопротивлений в статорные или в роторные цепи.

Инерционные постоянные H_j машин малого габарита получаются заметно меньше, чем у машин большой мощности, поэтому надлежащие значения GD^2 могут быть получены путем дополнительных маховых масс, насаживаемых, например, к соединительным муфтам. Наибольшие затруднения представляет получение необходимых значений относительных активных сопротивлений, так как у машин малых габаритов они имеют значительно повышенные значения по сравнению с машинами больших мощностей, подлежащих моделированию. Некоторое уменьшение относительных активных сопротивлений может быть получено уменьшением габаритной мощности машины модели, уменьшением сначала ее тока для снижения значения x'_d до необходимого его значения и затем одновременным уменьшением напряжения и тока, сохраняя их отношение, и, следовательно, и значение x_d неизменными. Для того, чтобы при сниженном напряжении иметь, однако, необходимое насыщение магнитной цепи и стандартную характеристику холостого хода, можно увеличивать площади пазов и соответственно сечение активной меди, что дает возможность получить одновременно и некоторое уменьшение относительного значения активного сопротивления статорной обмотки. Уменьшение габаритной мощности дает, в свою очередь, повышение в обратном отношении инерционной постоянной H_j.

Таким образом, например, при уменьшении габаритной мощности в 4 раза получается из нормальной машины в 100 *ква* с $H_j=0{,}575$ *сек*, $x_d=1{,}77$, $r_a=0{,}03$ и $r_f=0{,}005$ машина-модель в 25 *ква* с $H_j=3{,}1$ *сек*, $x_d=0{,}93$, $r_a=0{,}0068$ и $r_f=0{,}003$ (табл. 1; № 4 и № 6).

Если взять нормальную машину в 25 *ква*, то ее геометрические размеры должны были бы уменьшиться в $k=\sqrt[4]{\frac{100}{25}}=\sqrt{2}$ раза и, следовательно, ее инерционная постоянная $H_j=\frac{0{,}575}{\sqrt{2}}=0{,}406$ *сек*, $r_a=0{,}03\cdot\sqrt{2}=0{,}0425$ и $r_f=0{,}5\times\sqrt{2}=0{,}007$ (табл. 1, № 4 и № 5).

Если сделать модельный синхронный генератор шестиполюсным, то это даст возможность выполнить его статорную обмотку с шестью идентичными самостоятельными цепями в каждой фазе. Такой генератор может быть рассчитан таким образом, чтобы при номинальных данных и нормальном насыщении его магнитной цепи, позволяющем получение нормальной характеристики холостого хода, каждая фаза его статорной обмотки имела 3 параллельные ветви, причем чтобы каждая из этих ветвей имела 2 последовательные цепи. При простом переключении на доске зажимов каждая фазовая обмотка может быть пересоединена в этом случае на 2 параллельные и 3 последовательные цепи, что дает возможность иметь при прежнем значении номинального напряжения уменьшенный в 1,5 раза магнитный поток и соответственно практически ненасыщенную магнитную цепь. Для сохранения неизменными относительных значений реактивных и активных сопротивлений генератора в этом случае нужно уменьшить номинальное значение статорного тока и, следовательно, и номинального значения мощности в $1{,}5^2=2{,}25$ раза, что одновременно приведет к возрастанию величины инерционной постоянной генератора H_j в 2,25 раза.

Для получения относительных активных сопротивлений статорной и роторной цепей в машинах-моделях, точно соответствующих их значениям, для мощных машин-оригиналов можно компенсировать эти сопротивления электрическим путем, включая в эти цепи дополнительные источники электрической энергии, — возбудители излишнего омического падения напряжения. Одним из наиболее простых и регулируемых возбудителей омического падения напряжения является сериесная коллекторная машина переменного тока, работающая в режиме вынужденного возбуждения, исключающего ее самовозбуждение.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

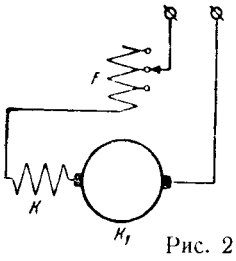

Рис. 2

Рис. 2. Схема однофазного последовательного компенсированного коллекторного возбудителя омического падения напряжения цепи ротора.

Для цепи возбуждения в качестве возбудителя омического падения напряжения может быть применена однофазная последовательная компенсированная коллекторная машина рис. 2 [Л. 3 и 4]. Подобная машина может самовозбуждаться только постоянным током как сериесный генератор постоянного тока, поэтому для исключения возможности самовозбуждения этой машины необходимо, чтобы при заданном значении ее рабочих токов омическое падение напряжения всей цепи возбуждения, включая и сам возбудитель, было больше, чем соответствующая индуктированная им э. д. с. Если сериесная машина имеет слабо насыщенную магнитную цепь, то выдаваемая ею мощность будет практически пропорциональна квадрату тока в цепи возбуждения, что дает возможность получить снижение результирующего относительного активного сопротивления цепи возбуждения до значения, соответствующего мощной машине-оригиналу.

Малая электродинамическая модель устойчивости. Автором при участии ряда работников Ленинградского политехнического института и конструкторского отдела завода «Электросила» (М. В. Латманизова, М. В. Костенко, О. В. Щербачева, Н. А. Моносзона, Д. В. Шапиро, И. С. Рабиновича, Н. Я. Самойлович и др.) был разработан в 1947—1948 гг. проект лаборатории электродинамического моделирования для изучения явлений, связанных с устойчивостью. В этот проект входят 4 явнополюсных синхронных машины, моделирующих гидрогенераторы, и 6 неявнополюсных синхронных машин, моделирующих турбогенераторы, мощностью в 5, 10, 15 и 20 *ква* с 50-ю вспомогательными машинами: двигателями, моделирующими гидравлические и паровые турбины, возбудителями постоянного тока и однофазными и трехфазными возбудителями омического падения напряжения роторных и статорных цепей синхронных машин. В настоящее время малая модель, представляющая наиболее существенную часть указанного выше проекта с четырьмя синхронными машинами мощностью в 5, 10 и 15 *ква* и 29-ю вспомогательными машинами, уже осуществлена.

На рис. 3 дан план комплектации машин указанной малой электродинамической модели устойчивости, состоящей из 5 генераторных агрегатов (агрегат № 5 является проектным) и 10 вспомогательных возбудительных агрегатов. Основные данные генераторных агрегатов приведены в табл. 2, данные возбудительных агрегатов омического падения напряжения приведены в табл. 3. Далее приводятся результаты некоторых предварительных экспериментальных исследований, произведенных автором с участием Е. Д. Трейвиш и Г. Н. Блавдзевича на модели, собранной из обычных лабораторных машин для исследования устойчивости одной из крупных энергосистем с мощной установкой ртутных выпрямителей, к которой была присоединена длинная линия электропередачи от вновь построенной

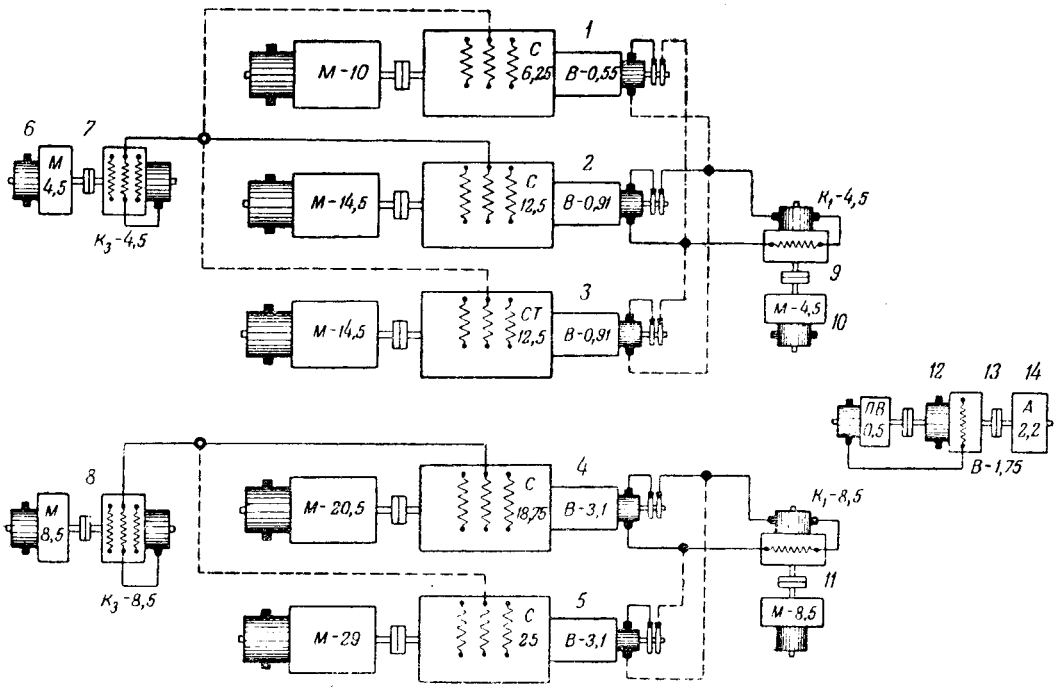

Рис. 3. План комплектации машин лаборатории электродинамической устойчивости.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

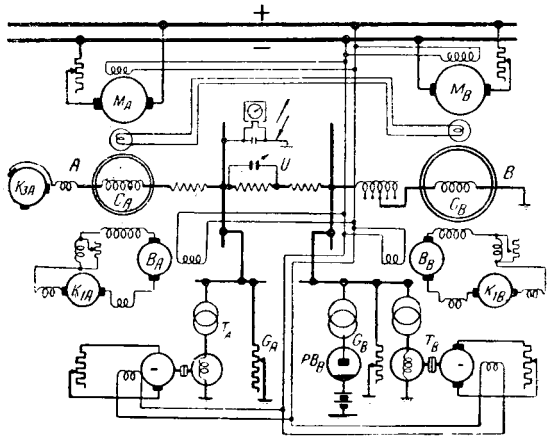

Рис. 4. Принципиальная схема лабораторной модели параллельной работы станций A и B при снятии осциллограмм (рис. 9 и 10).

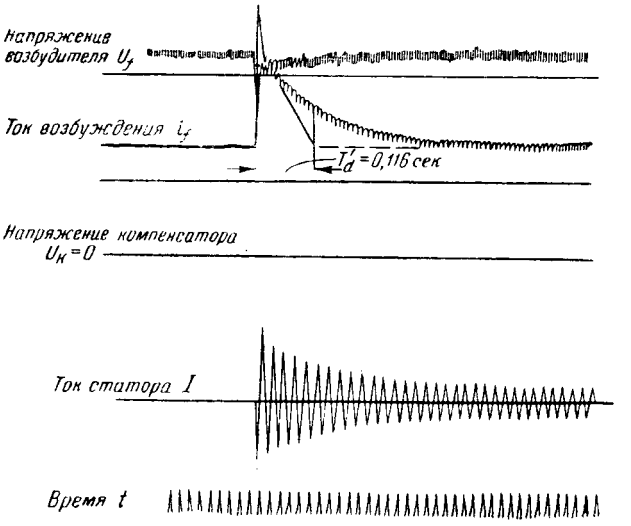

Рис. 5. Осциллограмма трехфазного короткого замыкания модельного синхронного генератора без сериесного возбудителя в цепи ротора.

мощной гидроэлектростанции. На этой лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 4, была проверена прежде всего возможность уменьшения относительного активного сопротивления и соответственного уменьшения постоянной времени переходного процесса T'_d посредством включения в цепь возбуждения добавочного возбудителя омического падения напряжения.

На рис. 5 дана осциллограмма трехфазного внезапного короткого замыкания синхронного модельного генератора без последовательного коллекторного возбудителя омического падения напряжения в цепи возбуждения. Из этой осцил-

Синхронные генераторные агрегаты электродинамической модели *Таблица 2*

№ агрегата	Синхронные генераторы явнополюсные (С) Неявнополюсные (СТ)			Возбудители постоянного тока (В)			Двигатели постоянного тока (ДП)			Число агрегатов
	Тип лабораторной модели	Номинальные данные		Тип лабораторной модели	Номинальные данные и тип исходной машины	Данные в режиме работы модели	Тип лабораторной модели	Номинальные данные и тип исходной машины	Данные в режиме работы модели	
		Насыщенный режим	Ненасыщенный режим							
1	С-6,25	6,25 *ква* 230 *в* 15,7 *а* cos φ = 0,8	2,78 *ква* 230 *в* 7 *а* cos φ = 0,8	В 0,55	0,55 *квт* 30 *в* 18 *а* (Возбудитель СГ-25)	0,125 *квт* 24 *в* 5,2 *а*	М 10	10 *квт* 110 *в* 110 *а* 1 090 *об/мин* (ПН-100)	1,1/7,5 *квт* 220/100 *в* 5/75 *а* 2 000/1 000 *об/мин*	1
2	С-12,5	12,5 *ква* 230 *в* 31,5 *а* cos φ = 0,8	5,55 *ква* 230 *в* 14 *а* cos φ = 0,8	В 0,91	0,91 *квт* 39 *в* 28 *а* (Возбудитель СГ-45)	0,22 *квт* 27 *в* 8,1 *а*	М 14,5	13,5 *квт* 110 *в* 145 *а* 1 050 *об/мин* (ПН-145)	1,1/14 *квт* 220/100 *в* 5,140 *а* 2 000/1 000 *об/мин*	1
3	СТ-12,5	12,5 *ква* 230 *в* 31,5 *а* cos φ = 0,8	5,55 *ква* 230 *в* 14 *а* cos φ = 0,8	В 0,91	0,91 *квт* 39 *в* 28 *а* (Возбудитель СГ-45)	0,32 *квт* 27,5 *в* 17 *а*	М 14,5	13,5 *квт* 110 *в* 145 *а* 980 *об/мин* (ПН-145)	1,1/14 *квт* 220/100 *в* 5/140 *а* 2 000/1 000 *об/мин*	
4	С-18,75	18,75 *ква* 230 *в* 47 *а* cos φ = 0,8	8,3 *ква* 230 *в* 20,8 *а* cos φ = 0,8	В 3,1	3,1 *квт* 25 *в* 124 *а* (ВС-18,5/8,5)	0,47 *квт* 27,5 *в* 17 *а*	М 20,5	20,5 *квт* 110 *в* 220 *а* 970 *об/мин* (ПН-205)	1,7/20 *квт* 220/100 *в* 8/200 *а* 2 000/1 000 *об/мин*	1
5	С-25 (проект)	25 *ква* 230 *в* 63 *а* cos φ = 0,8	11,2 *ква* 230 *в* 28 *а* cos φ = 0,8	В 3,1	3,1 *квт* 25 *в* 124 *а* (ВС-18,5/8,5)	0,38 *квт* 23,6 *в* 16 *а*	М 29	25,5 *квт* 110 *в* 275 *а* 980 *об/мин* (ПН-290)	2,6/26,2 *квт* 220/100 *в* 12/262 *а* 2 000/1 000 *об/мин*	1

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 3

Возбудительные агрегаты омического падения напряжения статорных и роторных цепей синхронных модельных генераторов

№ агрегата	Трехфазный коллекторный генератор (K_3)				Двигатель постоянного тока (М)			Число агрегатов
	Тип лабораторной модели	Возбуждаемый синхронный генератор	Данные при длительной работе и тип исходной машины	Данные при кратковременной работе	Тип лабораторной модели	Данные при длительной работе и тип исходной машины	Данные при кратковременной работе	
6 и 7	K_3 4,5	С-6,25 С-12,5 СТ-12,5	0,14—0,34 *ква* 5,1—5,7 *в* 15,7—31,5 *а* 1 800—2 290 *об/мин* (ПН-45)	2,2—4,9 *ква* 15,5—22,5 *в* 63—126 *а* 1 700—2 210 *об/мин*	М 4,5	4,4 *ква* 220 *в* 25 *а* (ПН-45)	6,5 *ква* 220 *в* 38 *а*	2
8	K_3 8,5	С-18,75 С-25	0,27—0,37 *ква* 2,5—4,5 *в* 47—63 *а* 1 240—1 480 *об/мин* (ПН-85)	4,3—5,8 *ква* 9,8—17,8 *в* 189—252 *а* 1 140—1 275 *об/мин*	М 8,5	5,6 *ква* 220 *в* 30 *а* (ПН-85)	11,5 *ква* 220 *в* 68 *а*	1
	Однофазный коллекторный генератор (K_1)							
9 и 10	K_1 4,5	С-6,25 С-12,5 СТ-12,5	0,14—0,36 *ква* 25,5—31,8 *в* 5,2—11,4 *а* 1 600—1 830 *об/мин* (ПН-45)	1,2—3,2 *ква* 79—94,4 *в* 15,6—34,2 *а* 1 600—1 830 *об/мин*	М 4,5	4,4 *ква* 220 *в* 25 *а* (ПН-45)	6,5 *ква* 220 *в* 38 *а*	2
11	K_1 8,5	С-18,75 С-25	0,42—0,5 *ква* 18,1—29,2 *в* 17—23,6 *а* 1 180—1 520 *об/мин* (ПН-85)	3,8—4,4 *ква* 54—87 *в* 51—71 *а* 1 180—1 520 *об/мин*	М 8,5	5,6 *ква* 220 *в* 30 *а* (ПН-85)	11,5 *ква* 220 *в* 68 *а*	1

лограммы переходная постоянная времени T'_d получилась равной 0,112 *сек*. На рис. 6 дана осциллограмма трехфазного внезапного короткого замыкания при тех же условиях, но при наличии сериесного однофазного коллекторного возбудителя падения напряжения в цепи возбуждения, из которой постоянная времени T'_d получилась равной 0,99 *сек*, т. е. постоянная времени T'_d оказалась увеличенной в 9 раз. Принципиально таким же методом может быть уменьшено и относительно активное сопротивление статорной цепи модельной синхронной машины для получения величин этого сопротивления, соответствующего его значению для мощной машины-оригинала. Для этого в нейтраль синхронного генератора можно включить трехфазную последовательную коллекторную машину, рис. 7, работающую также в режиме вынужденного возбуждения [Л. 4]. В данном случае нужно прежде всего обратить внимание на то, что обычные типы трехфазных последовательных двигателей для работы их в режиме трехфазных последовательных генераторов обычно оказываются непригодными из-за того, что в режиме работы генераторов они легко самовозбуждаются низкой частотой переменного тока. Это объясняется тем обстоятельством, что для повышения $\cos\varphi$ трехфазных последовательных двигателей приходится выполнять их с числом витков ротора больше числа витков статора для получения роторного возбуждения и снижения намагничивания, поступающего из питающей цепи. В этом случае последовательная машина оказывается с некомпенсированной реакцией якоря и поэтому имеет условия, благоприятствующие самовозбуждению переменным током. Если же выполнить последовательный трехфазный коллекторный генератор с полной компенсацией реакции якоря и отдель-

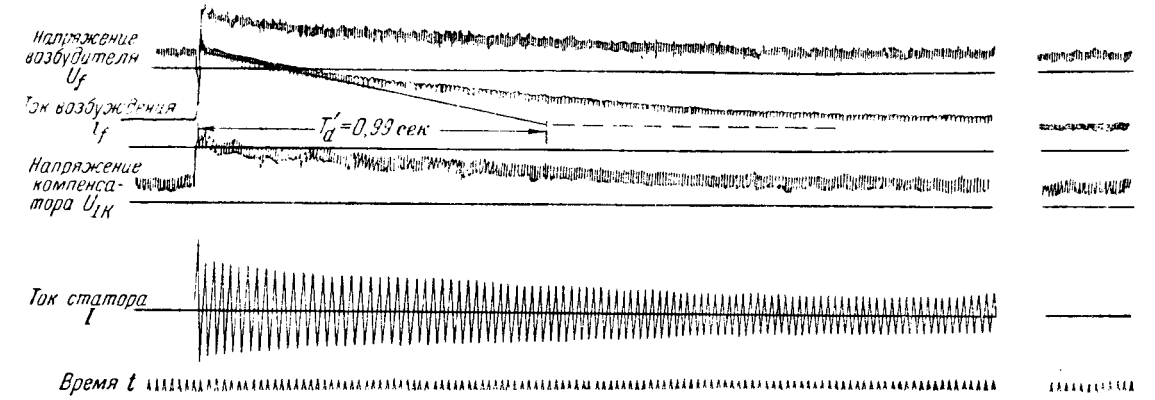

Рис. 6. Осциллограмма трехфазного короткого замыкания модельного синхронного генератора с сериесным возбудителем в цепи ротора.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

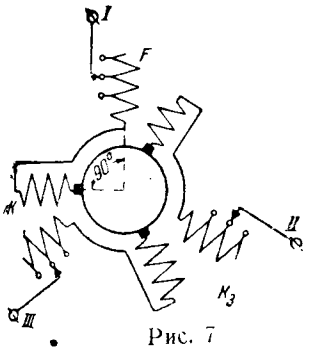

Рис. 7

Рис. 7. Схема трехфазного последовательного компенсированного коллекторного возбудителя с омического падения напряжения цепи статора.

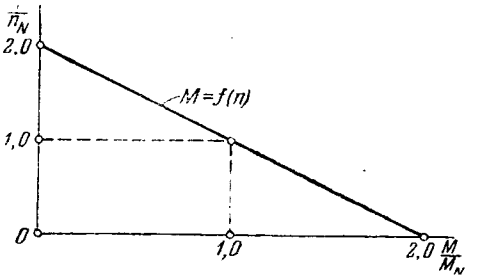

Рис. 8. Моделированная зависимость скорости от момента на валу гидротурбины.

ной последовательной возбуждающей обмоткой (рис. 7), то результирующее число витков статора в этом случае получится больше числа витков ротора, вследствие чего трехфазная последовательная машина подобно однофазной последовательной машине сможет возбуждаться только постоянным током. Самовозбуждение при этом будет соответствовать полному покрытию всего омического падения напряжения за счет э. д. с. генератора, т. е. будет соответствовать значению постоянной времени $T_a \approx \infty$. Так как T_a должна иметь некоторое определенное значение, обычно меньше 0,5 *сек*, то всегда можно отрегулировать машину посредством изменения числа витков цепи возбуждения или ее скорости вращения таким образом, чтобы возбуждение постоянным током было также полностью исключено.

Моделирование гидротурбины, вращающей синхронный генератор электростанции, может быть в простейшем виде осуществлено посредством двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, у которого в цепь якоря включено значительное омическое сопротивление, понижающее примерно в 2 раза при номинальном моменте на валу генератора напряжение на зажимах якоря двигателя по сравнению с напряжением сети. При коротком замыкании на шинах станции с данным генератором происходит внезапный сброс нагрузки, что приводит к разгону двигателя и соединенного с ним генератора [Л. 1 и 4]. Зависимость скорости вращения от момента на валу $M = f(n)$ будет иметь вид падающей кривой рис. 8, дающей при $M = 0$ удвоенную скорость по сравнению с номинальным нагрузочным режимом, и при двойном моменте $n = 0$. Получаемая таким путем кривая изменения скорости моделирует в первом приближении соответствующую зависимость $M = f(n)$, характерную для гидротурбины типа Френсиса. Более точное моделирование может быть осуществлено применением, например, электронных регуляторов по методу С. Гохберга [Л. 6] и В. Веникова [Л. 9].

На рис. 9 дана осциллограмма работы синхронного модельного генератора без сериесного трехфазного возбудителя в цепи статора при его работе через две цепи линии передачи на шины бесконечной мощности и коротком замыкании одной из линий на зажимах генератора рис. 10,*а*. В этом случае был получен устойчивый режим при отключении короткозамкнутой линии через 0,18 *сек*.

На рис. 11 дана вторая осциллограмма при совершенно аналогичных условиях, но при включенном в нейтраль генератора сериесном трехфазном возбудителе, отрегулированном таким обра-

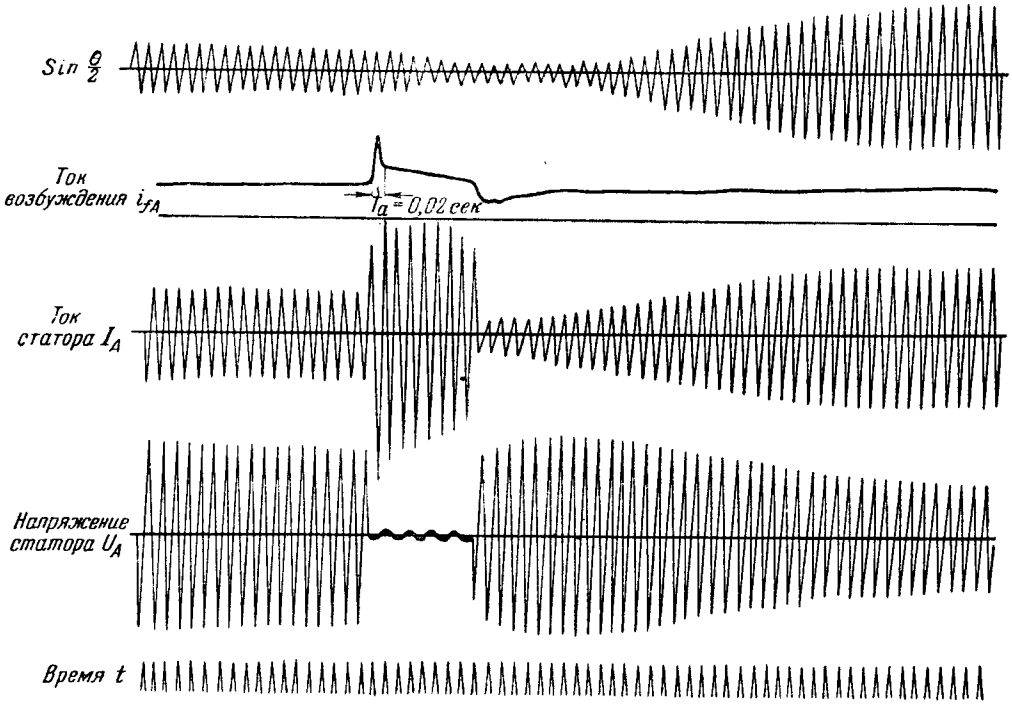

Рис. 9. Осциллограмма трехфазного короткого замыкания. Работа модельного синхронного генератора на шины бесконечной мощности через двухцепную линию без сериесного возбудителя в цепи статора. Устойчивый режим работы, $t_{кз}$ = 0,18 *сек*.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

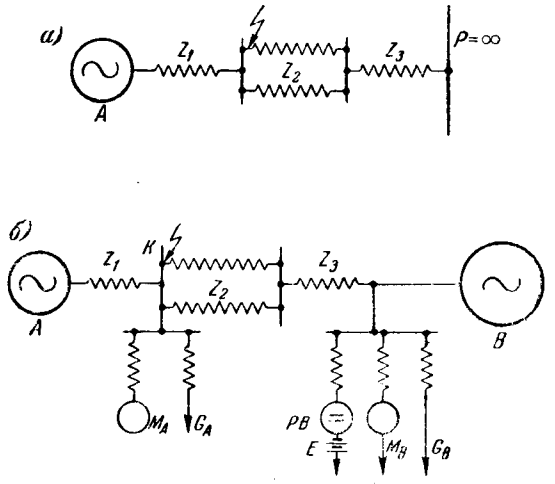

Рис. 10.

а) Схема при работе модельного синхронного генератора от сети бесконечной мощности. б) Схема модели из двух станций, соединенных двухцепной линией.

зом, что относительное активное сопротивление цепи статора соответствовало его значению для машины большой мощности. В этом случае после отключения короткозамкнутой линии через то же время 0,18 *сек*, то и в первом случае, получался неустойчивый режим системы, соответствующий выпадению модельного синхронного генератора из синхронизма. Это выпадение из синхронизма было в данном случае вызвано тем обстоятельством, что из-за снижения относительного активного сопротивления статорной цепи в период короткого замыкания 0,18 *сек* модельный генератор получил настолько большой угол отклонения его э. д. с. от вектора напряжения сети бесконечной мощности, что при отключении короткозамкнутой линии он уже оказался в неустойчивом режиме и поэтому выпал из синхронизма.

Если выполнить лабораторные модели машин не на нормальную, а на повышенную частоту, то относительные активные сопротивления получат принципиально соответственно пониженные значения. Однако в этом случае, с одной стороны, труднее сохраняются основные положения геометрического подобия из-за повышения чисел полюсов модели при той же окружной скорости и, с другой стороны, нарушается физическое подобие в отношении потерь в стали и добавочных потерь в меди. С другой стороны, в этом случае в лабораторной модели нельзя будет использовать нормальные регуляторы напряжения, настроенные на нормальную частоту, а при всех измерениях придется прибегать ко всем другим измерительным приборам повышенной частоты, что также не является рациональным, поэтому моделирование машин на нормальной частоте имеет ряд весьма заметных преимуществ.

При динамическом моделировании весьма хорошо можно моделировать нагрузку в виде ртутно-выпрямительных агрегатов даже с обратной э. д. с., являющихся нелинейным элементом системы. Если такая нагрузка находится на приемном конце линии передачи, то при коротком замыкании на линии происходит заметная посадка напряжения на приемном конце. При достаточно большой обратной э. д. с. в цепи выпрямленного тока происходит практически мгновенное отключение этой нагрузки, причем, если эта нагрузка составляет достаточно большой процент от полной нагрузки приемного конца, то это приводит к уменьшению углового замедления роторов генераторов приемного конца, что увеличивает предел устойчивости работы системы [Л. 4].

На рис. 12 приведена осциллограмма короткого замыкания на одной из линий у отправительного конца при параллельной работе двух станций рис. 10,*б* с отношением мощностей станций отправительного и приемного конца 1 : 2,5 для случая, когда нагрузка не включает ртутно-выпрямительных агрегатов и происходит выпадение из синхронизма 1-й станции при предельном времени отключения короткого замыкания 0,19 *сек*.

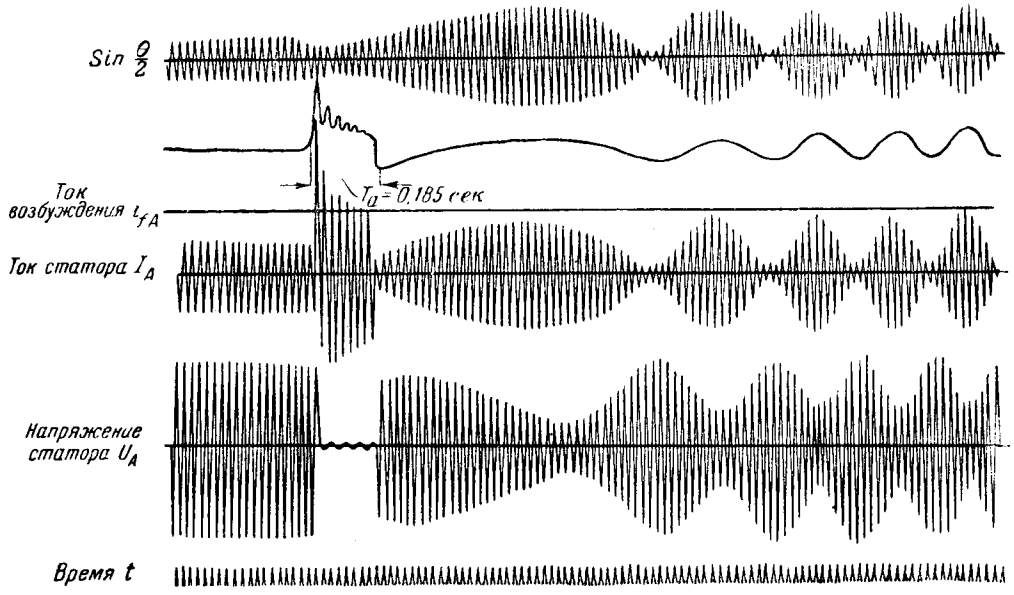

Рис. 11. Осциллограмма трехфазного короткого замыкания. Работа модельного синхронного генератора на шины бесконечной мощности через двухцепную линию при наличии сериесного возбудителя в цепи статора. Неустойчивый режим $t_{кз} = 0,18$ *сек*.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

На рис. 13 приведена такая же осциллограмма для случая, когда на приемном конце имеется ртутно-выпрямительная нагрузка с обратной э. д. с. 75% от выпрямленного напряжения, составляющая 30% от общей нагрузки приемного конца. Из этой осциллограммы можно видеть, что при отключении короткого замыкания через 0,22 *сек* система остается устойчивой и ее выпадение из синхронизма происходит только при времени короткого замыкания 0,24 *сек*. Принципиальная схема лабораторной установки для двух станций при снятии осциллограмм рис. 12 и 13 дана на рис. 4.

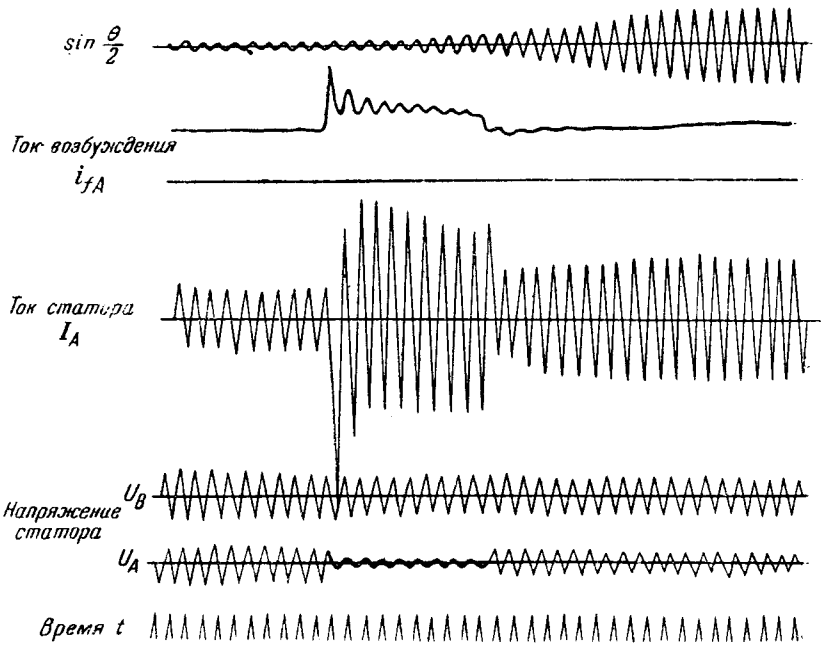

Рис. 12. Осциллограмма трехфазного короткого замыкания. Параллельная работа станций *A* и *B* через двухцепную линию. Неустойчивый режим работы, $t_{кз} = 0{,}19$ *сек*.

Произведенный теоретический анализ и экспериментальные исследования показали полную возможность, наряду с методом математического моделирования, применения метода физического моделирования на вращающихся машинах. В этом отношении приходится не согласиться с указанием, сделанным в статье Н. Меера и Н. Шульца (N. Meyers и N. Schultz) о том, что, хотя применение для изучения устойчивости миниатюрных систем с двумя или тремя машинами и относительно длинными линиями [Л. 5], применявшихся ранее, и имело ряд отчетливых преимуществ в отношении получения непосредственных качественных физических результатов, но что достигнуть количественных результатов было якобы трудно при применении подобных систем. Это объяснялось в указанной статье трудностью построения модели синхронных машин с характеристиками, соответствующими мощным машинам, что и вызвало по мнению авторов необходимость в развертывании аналитических методов для анализа систем и преобразования синхронных машин.

Нужно отметить далее, что при лабораторных установках с динамическими моделями возможно получение экспериментальным путем с весьма высокой степенью точности данных, параметров и характеристик моделей электрических машин, которые соответствуют современным крупным машинам, поэтому все научные исследования процессов на них могут производиться на весьма высоком уровне точности. Наоборот, при математическом моделировании приходится пользоваться параметрами реальных машин-оригиналов, которые определяются не только расчетно, но и экспериментально, обычно с точностью не выше 13—15%, поэтому проверка аварийных случаев и процессов на действительных энергосистемах не может иметь предельно точной достоверности, достижимой в малых моделях.

Осуществление моделей электрических машин и аппаратов может быть выполнено проще и скорее, чем громоздких и сложных расчетных столов и счетных машин интеграторов. Кроме того, следует отметить, что лаборатория динамического моделирования может легко расширяться и видоизменяться.

В том случае, если заводами будут выпущены серии модельных основных и вспомогательных машин, то эти системы могут быть доступны более широкому кругу потребителей, в то время как расчетные столы и другие счетные машины и аппараты практически являются доступными только большим научным учреждениям или крупным объединениям энергосистем.

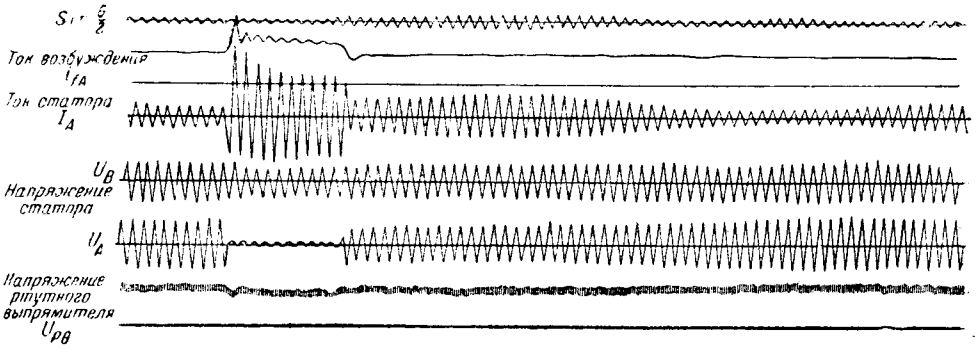

Рис. 13. Осциллограмма трехфазного короткого замыкания. Параллельная работа станций *A* и *B* через двухцепную линию при наличии на станции *B* нагрузки с ртутными выпрямителями с обратной э. д. с. 75%. Устойчивый режим работы, $t_{кз} = 0{,}22$ *сек*.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Литература

1. В. А. Веников. Моделирование электрических систем при помощи вращающихся машин. Электричество, стр. 48, № 9, 1939.
2. В. Иванов. Электродинамическая модель электропередачи Куйбышев — Москва. Труды ЛПИ, стр. 1, № 2, 1941.
3. В. А. Веников. Сериесный генератор постоянного тока как отрицательное сопротивление. Электричество, стр. 25, № 1—2, 1945.
4. М. П. Костенко и Е. Д. Трейвиш. Моделирование электрических машин и трансформаторов при экспериментальном исследовании устойчивости параллельной работы электрических станций. Труды ЛПИ, стр. 48, № 1, 1946.
5. N. Meyers and N. Schultz. Расчетный стол переменного тока для исследования сетей. GER, стр. 34, 1946.
6. С. Гохберг. Электронный регулятор вращающего момента машин постоянного тока в электродинамической модели электропередачи. Труды ЛПИ, стр. 54, № 5, 1947.
7. В. Иванов, С. Гохберг и Г. Александров. Результаты экспериментов на электродинамической модели электропередачи длиною 900 *км*. Труды ЛПИ, стр. 62, № 5, 1947.
8. H. David and J. Favereau. Устойчивость генераторов переменного тока с последовательным возбуждением, соединенных через длинную линию с системой большой мощности. CIGRE, № 305, 1948.
9. В. А. Веников. Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. Госэнергоиздат, 1949.

[3. 5. 1950]

Электрическая печь, как потребитель-регулятор энергосистемы

Доктор техн. наук, проф. Г. А. СИСОЯН

Грузинский политехнический институт им. Кирова

Приведены соображения о целесообразности использования мощных руднотермических электропечей для улучшения графика нагрузки электростанций. Печатается в порядке обсуждения.

Потребление электроэнергии в руднотермических и сталеплавильных печах играет заметную роль в общем электробалансе некоторых энергосистем. Взаимное влияние печных установок и энергоснабжающей системы весьма велико. Можно сказать, что поведение такой системы в основном определяется электротермическими установками, а режим их работы как в суточном, так и годовом разрезе определяется и лимитируется работой и возможностями энергоснабжающей системы.

В плановом хозяйстве проблемы строительства и эксплоатации электротермических установок и электростанций решаются комплексно, поэтому и оптимальный режим работы должен выбираться не для одного звена, а для всего комплекса: электростанция — электропечи в целом. В некоторых случаях при таком комплексном решении вопроса режим работы электропечей или системы при обособленной оценке может получиться менее выгодным, но с народнохозяйственной точки зрения такое решение нам кажется вполне оправданным.

На рис. 1 приведен годовой график энергосистемы (кривая *3*), питающей руднотермические печи, и график нагрузки самих печей (кривая *1*). Как видим из графиков, коэффициент загрузки печей по электроэнергии составил всего 0,45, а по выходу товарной продукции и того меньше, так как простой печей всегда сопряжен с повышением удельного расхода электроэнергии. Следует отметить, что энергоснабжение электропечей шло неравномерно не только в годовом, но и в месячном и суточном разрезе. Особенно часто отключались печи в часы прохождения вечерних пиков нагрузки системы. Таким образом, в рассматриваемом случае руднотермические печи являются для системы потребителем-регулятором в полном смысле этого слова. Печи работали с недогрузкой, но с народнохозяйственной точки зрения это следует считать оправданным, так как благодаря такому методу эксплоатации печей энергоснабжающая система сумела использовать все свои возможности в период половодья.

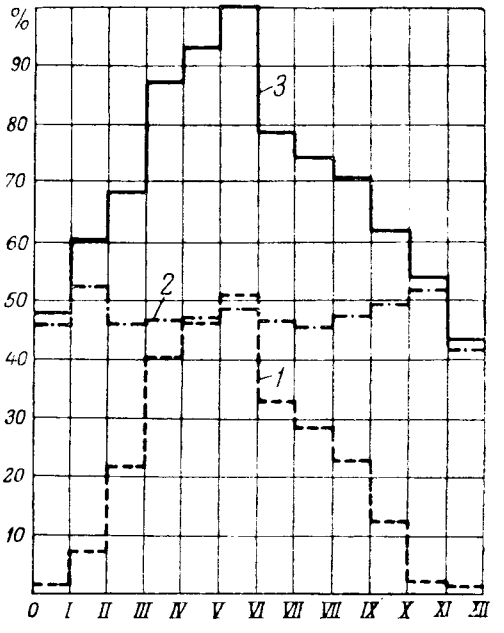

Рис. 1. Годовой график загрузки энергосистемы.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Необходимо заметить, что не только система нерегулируемых гидроэлектростанций, как это было в рассмотренном случае, но и любая система гидро- и теплоэлектростанций имеет возможность питать по определенному принудительному графику потребителей-регуляторов.

В наших мощных энергосистемах уплотнение суточных графиков хотя бы на 5—10% может дать внушительную цифру выработки дополнительной электроэнергии для нужд руднотермической промышленности.

Экономическая оценка режима работы потребителя-регулятора. Целесообразность работы того или иного агрегата в режиме потребителя-регулятора определяется прежде всего экономическими предпосылками. Эта проблема достаточно хорошо освещена в нашей литературе. Рентабельность электропечей в режиме потребителя-регулятора должна быть рассчитана по двум основным показателям — по капиталовложениям и по себестоимости продукции [Л. 1,2]. При расчете нужно сравнить печи-регуляторы, работающие по принудительному графику нагрузки, с обычной электропечью, работающей по свободному графику.

Здесь могут быть два варианта расчета. В первом варианте задаются определенной годовой продукцией и находят пределы рентабельной мощности электропечей при работе в режиме потребителя-регулятора. Этот вариант применим для вновь проектируемых печей.

Во втором варианте задаются определенной мощностью электропечей и ищут их рентабельный режим по продукции. Этот вариант применим к эксплоатируемым печам.

Рассмотрим оба метода расчета рентабельности работы электропечей в режиме потребителя-регулятора.

Обозначим через B годовую продукцию данной печи при работе по свободному графику нагрузки, а через A — фактическую продукцию, определяемую характером задаваемого электропечам принудительного графика энергоснабжения. Тогда отношение между этими величинами даст коэффициент загрузки завода при работе по принудительному графику:

$$\gamma = \frac{A}{B}. \qquad (1)$$

Если бы для заданного количества продукции мы построили электропечи со свободным графиком энергоснабжения, мы должны были бы для их питания предусмотреть и соответствующей мощности энергобазу. При постройке же печей-регуляторов дополнительных капиталовложений на это не потребуется, так как энергосистема будет питать печи за счет излишков своего графика. Но для получения той же продукции требуется увеличение мощности печей, так как коэффициент загрузки меньше единицы. Следовательно, дополнительных капиталовложений потребует строительство самих электропечей.

Если обозначим: K_0 — капиталовложения в обычные электропечи; K_s — капиталовложения в генерирующую мощность для питания обычных электропечей; K — капиталовложения в печи-регуляторы; α — коэффициент, учитывающий потерю мощности от электростанции до электропечей. Экономический эффект работы печей регуляторов по капиталовложениям определится уравнением

$$\delta = K_0 + K_s - K. \qquad (2)$$

Если $\delta > 0$ — экономичнее электропечь-регулятор, так как она требует меньше капиталовложений, если $\delta < 0$ — экономичнее строительство обычных электропечей с одновременным созданием специальной энергобазы (конечно, в пределах энергосистемы) и, наконец, если $\delta = 0$, то оба варианта равноэкономичны.

Примем отношение годовой производительности электропечей к их мощности P за постоянную величину, т. е. положим, что каждый киловатт установленной мощности агрегатов может дать одну и ту же продукцию независимо от полной мощности всех электропечей. Это положение имеет место в отношении почти всех однотипных печей и теряет силу только тогда, когда мощность отдельных агрегатов резко снижается.

Так как для обычно работающей электропечи мощностью P_0 годовая производительность B совпадает с годовой фактической продукцией A, то мы можем записать:

$$\frac{B}{P} = \frac{A}{P_0} = \text{const}, \qquad (3)$$

тогда отношение мощностей обычной печи и печи-регулятора согласно (1) будет равно коэффициенту загрузки

$$\frac{P_0}{P} = \frac{A}{B} = \gamma. \qquad (4)$$

Если обозначить капиталовложения на 1 *квт* установленной мощности для нормальной печи через n_0, для электростанции через n_s и для печи-регулятора через n, то уравнение (2) для рассматриваемых вариантов можно переписать двояко.

При первом варианте расчета, задается годовая продукция электропечи A (следовательно, известно P_0) и ищется P. Пользуясь (4), уравнение (2) можем переписать так:

$$\delta = K_0 + K_s - K = n_0 P_0 + \alpha n_s P_0 - nP.$$

Исключив P_0, мы получим значение δ через искомую мощность P:

$$\delta = [(n_0 + \alpha n_s)\gamma - n]P. \qquad (5')$$

В общем случае удельные капиталовложения n являются функцией мощности P. В литературе описываются методы расчета печей-регуляторов с учетом этой зависимости, мы же в первом приближении примем их постоянными и равными удельным капиталовложениям при мощности P_0, т. е. положим $n = n_0$, тогда уравнение (5′) перепишется так:

$$\delta = [(n_0 + \alpha n_s)\gamma - n_0]P. \qquad (5)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

При втором варианте, когда задается мощность электропечи P и ищется оптимальная фактическая продукция A и соответствующая ей мощность обычной электропечи P_0, из (2) и (4) имеем:

$$\delta = n_0 P_0 + \alpha n_s P_0 - nP$$

или, исключив P,

$$\delta = \left[n_0 + \alpha n_s - \frac{n}{\gamma} \right] P_0. \qquad (6')$$

В этом уравнении вместе с переменным P_0 меняется и n_0, но, так же как и в предыдущем случае, примем n_0 постоянным и равным капиталовложениям при заданной мощности P, т. е. положим $n_0 = n$, тогда уравнение (6′) перепишется так:

$$\delta = \left[n + \alpha n_s - \frac{n}{\gamma} \right] P_0. \qquad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) можно определить допустимый минимум коэффициента загрузки, положив $\delta = 0$. При заданной годовой продукции, когда дано P_0 и ищется оптимальная мощность печи-регулятора P, минимальный коэффициент загрузки будет:

$$\gamma'_{мин} = \frac{n_0}{n_0 + \alpha n_s}. \qquad (7)$$

При заданной мощности электропечи, когда дано P и ищется оптимальная годовая продукция A и соответствующая мощность P_0, минимальный коэффициент загрузки в режиме потребителя-регулятора будет:

$$\gamma''_{мин} = \frac{n}{n + \alpha n_s}. \qquad (8)$$

Как видим, в обоих вариантах допустимый минимум коэффициента загрузки печи в режиме потребителя-регулятора зависит от удельных капиталовложений. В уравнении (7) $\gamma_{мин}$ выражена через задаваемый n_0, а в уравнении (8) — через задаваемый n.

Рассмотрим ту же проблему с точки зрения себестоимости продукции. Так как задачу мы решаем с общей народнохозяйственной точки зрения, то в дальнейших выкладках принимаем во внимание себестоимость электроэнергии, а не тарифные расценки.

Себестоимость единицы продукции руднотермических печей можно разложить на три слагающие:

1. U_1 — постоянная слагающая, независимая от производительности печей, кроме электроэнергии. В эту величину входят стоимость сырья и материалов на единицу продукции, прямая зарплата и т. д.

2. U' — стоимость электроэнергии на единицу продукции.

3. U_2 — переменная слагающая, зависящая от производительности печей. В эту величину входят общезаводские расходы. С увеличением производительности печей составляющая себестоимости единицы продукции уменьшается. Если обозначить через S_0 средневзвешенную себестоимость электроэнергии без учета отпуска по принудительному графику, а через W удельный расход энергии, то себестоимость единицы продукции для нормально работающей печи можно выразить уравнением

$$U_0 = U_1 + S_0 W + U_2. \qquad (9)$$

При переводе печей на принудительный график, т. е. в режим потребителя-регулятора, удельный расход энергии возрастет, но вместе с тем снизится себестоимость энергии, так как энергия, отпускаемая по принудительному графику, обходится дешевле. При этом режиме постоянная слагающая себестоимости U_1, конечно, останется без изменения, а переменная U_2 будет меняться обратно пропорционально производительности. Если обозначить через β — коэффициент возрастания удельного расхода энергии, а через S — себестоимость энергии, отпускаемой по принудительному графику, то себестоимость единицы продукции в режиме потребителя-регулятора выразится уравнением:

$$U = U_1 + \beta W S + \frac{U_2}{\gamma}. \qquad (10)$$

Очевидно, с точки зрения себестоимости минимум коэффициента загрузки мы будем иметь при равенстве себестоимостей по обоим вариантам. Приравнивая уравнение (9) и (10), получим:

$$\gamma_{мин} = \frac{U_2}{U_2 + S_0 W - \beta W S}. \qquad (11)$$

Как видим, рентабельность работы электропечей в режиме потребителя-регулятора с точки зрения себестоимости зависит от целого ряда факторов. В трудах С. А. Кукель-Краевского, М. Л. Элькинда, Т. Л. Золотарева, А. М. Осепяна дается экономический анализ режима работы потребителя-регулятора [Л. 1, 2, 3, 4]. Рассмотрим теперь влияние технологического процесса на основные факторы, определяющие рентабельность работы руднотермических установок в режиме потребителя-регулятора.

Зависимость коэффициента загрузки от себестоимости энергии, вырабатываемой по принудительному графику. Себестоимость энергии, вырабатываемой тепловой электростанцией, распадается на две составляющие: одна определяется стоимостью топлива, другая — остальными расходами электростанции. При выработке электроэнергии по принудительному для потребителя графику основную роль играет топливная составляющая, так как эта выработка не вызывает никаких изменений в общей схеме эксплоатации станции. Поэтому без большой погрешности можно принять, что себестоимость энергии, выработанной по принудительному графику, будет больше топливной составляющей примерно на 15—25%. Для оценки влияния этого фактора на рентабельность эксплоатации в принудительном режиме на рис. 2 построены кривые зависимости γ_m от S_m -топливной составляющей для трех сплавов. Удельные нормы расхода энергии приняты для

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

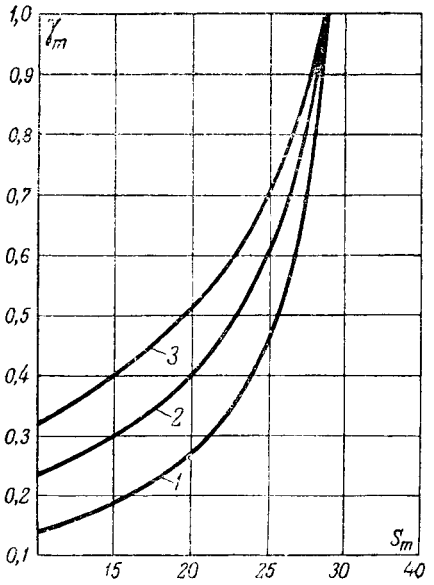

Рис. 2. Зависимость минимального коэффициента загрузки γ_m от топливной составляющей S_m.

1 — Для 75-процентного ферросилиция; *2* — для 45-процентного ферросилиция; *3* — для ферромарганца и карбида кальция.

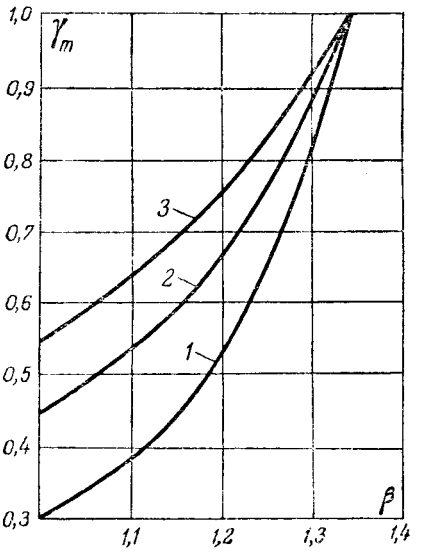

Рис. 3. Зависимость коэффициента загрузки γ_m от коэффициента повышения удельного расхода энергии β. (Обозначения кривых см. рис. 2.)

первого сплава — 9 000 *квтч/т.*, второго — 5 000 *квтч/т*, а для третьего сплава — 3 200 *квтч/т*.

Эти нормы примерно соответствуют выплавке 75-процентного ферросилиция, 45-процентного ферросилиция и ферромарганца или карбида кальция. Для всех трех кривых коэффициент перерасхода электроэнергии принят равным 1,15. Кривые показывают, что с увеличением топливной составляющей, а значит и общей стоимости энергии, вырабатываемой по принудительному графику, пределы рентабельности потребителя-регулятора резко сокращаются. При данной же топливной составляющей наибольший эффект регулирования дают наиболее энергоемкие сплавы.

С этой точки зрения питание потребителей по принудительному графику от гидроэлектростанций имеет исключительные преимущества, так как пропорциональные расходы на гидроэлектростанциях ничтожно малы. Особенно эффективно наличие потребителей-регуляторов для нерегулируемых гидроэлектростанций. Максимумы водотоков на таких станциях можно полностью использовать исключительно только энергоемкими потребителями, могущими работать по принудительному графику. Следует, однако, заметить, что гидроэлектростанции, полностью зарегулированные или работающие на вековых запасах воды, должны трактоваться так же, как и тепловые станции, так как вековые или зарегулированные запасы гидроэлектростанции, в конце концов, не отличаются от запасов топлива.

Зависимость коэффициента загрузки от удельного расхода электроэнергии. Выше мы указали, что с переводом печной установки на принудительный график удельный расход электроэнергии растет. Для оценки этого явления мы ввели коэффициент роста удельного расхода электроэнергии β. Причины роста удельного расхода электроэнергии мы рассмотрим позже. Остановимся сейчас на зависимости минимального коэффициента загрузки от β и W.

На рис. 3 приведены кривые зависимости γ_n от β для трех различных случаев эксплоатации одной и той же установки. Расчет произведен по формуле (11) и для всех трех случаев приняты одни и те же значения U_2, S_0 и S. Удельные нормы расхода энергии для нормальной эксплоатации приняты такие же, что и для рис. 2. Кривые показывают довольно резкую зависимость минимального коэффициента загрузки от β. В пределах, где β не превосходит 1,1—1,2, эффективность работы электропечи регулятором энергосистемы тем выше, чем больше удельный расход электроэнергии. Для 75-процентного ферросилиция минимальный коэффициент получается 0,3, для 45-процентного ферросилиция — 0,44, а для ферромарганца и карбида кальция — 0,55. Однако с увеличением β все кривые резко загибаются вверх и тем резче, чем больше энергоемкость сплава. Отсюда вывод: чем больше энергоемкость сплава, тем рентабельнее эксплоатация электропечей-регуляторов системы при условии, что перерасход электроэнергии против нормы на единицу продукции не превосходит определенной величины.

Рассмотрим теперь причины перерасхода электроэнергии при регулировании.

Тепловые потери и работа электропечи при сезонном регулировании. При сезонном регулировании отпуск электроэнергии электропечам-регуляторам производится только в определенные периоды года. Цель этого метода регулирования — повышение коэффициента заполнения годовых графиков энергосистемы. Особенно важен такой метод для незарегулированных гидросистем. На рис. 1 был показан типичный пример такой систе-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

мы. Благодаря наличию потребителя-регулятора системе удалось использовать весенне-летний водоток и значительно уплотнить свой годовой график. Основной недостаток такого метода регулирования заключается в периодическом изменении теплового режима электропечей, так как периодически приходится включать и отключать несколько печей. Однако перерывы в подаче электроэнергии на длительный период особых затруднений при эксплоатации не вызывают, если только эти перерывы происходят планово. В таких случаях перед остановкой электропечи проводят ряд подготовительных работ: прекращают подачу шихты, снижают мощность и по возможности расширяют тигли под электродами, а сами электроды поднимают вверх. После этого печь ставят в резерв или на ремонт. При повторном пуске постепенно разогревают существующие тигли и начинают дачу шихты. Каждая такая остановка печи связана с потерей тепла, аккумулированного в ванне. Этой потерей тепла и обусловливается повышение удельного расхода электроэнергии при сезонном регулировании.

Теоретический подсчет электроэнергии, аккумулированной в ванне печи, не приводит к удовлетворительным результатам из-за ненадежности констант, которыми приходится пользоваться при таких подсчетах.

Вочке [Л. 9] указывает, что у печей порядка 10 *мгвт* потери на разогрев приближенно соответствуют 5—7-часовому нормальному расходу электроэнергии, а у небольших печей эти потери меньше. Таким образом, по данным Вочке, для печи 7,5 *мгвт* аккумулированная в печи энергия должна составлять около 40—50 *мгвтч*. Однако проведенные нами испытания на печах мощностью 7,5 *мгвт* и 5 *мгвт*, а также обработка эксплоатационных данных показывают, что расход электроэнергии на разогрев значительно больше.

При определении потери электроэнергии на разогрев надо учитывать не только аккумулируемое в ванне тепло, но и то количество тепла, которое теряет ванна в период разогрева, когда печь идет вхолостую и не дает еще продукции. По нашим подсчетам полные тепловые потери электропечи мощностью 7,5 *мгвт* на один цикл разогрева составляют около 200—250 *мгвтч*.

Если считать, что в силу сезонности энергоснабжения в течение года имеют место четыре остановки печи и коэффициент загрузки составляет 0,5 (считаем наихудшие условия), то общий перерасход энергии составит около 1 000 *мгвтч*, или около трех процентов нормального расхода энергии. Это, конечно, величина небольшая и рентабельность эксплоатации руднотермических печей в режиме сезонного потребителя-регулятора очевидна. Необходимо только при установлении удельной нормы расхода энергии учесть коэффициент роста этой нормы.

Рассмотрим теперь более важную проблему суточного регулирования системы.

Тепловые потери и работа электропечи при суточном регулировании. Суточное регулирование системы при помощи потребителя-регулятора имеет целью повышение коэффициента заполнения суточных графиков и смягчение их пиков. Этот вид регулирования связан с ежесуточными отключениями электропечей на несколько часов.

Для энергосистем с преобладающей промышленной нагрузкой длительность вечерних пиков составляет около 4—5 *час*. Поэтому система обычно требует отключения потребителя-регулятора на этот отрезок времени.

В период отключения и повторного включения тепловой режим электропечи из установившегося переходит в неустановившийся. Проблема определения рентабельности работы печи в зависимости от длительности отключения сводится к определению тепловых потерь в период простоя. Наблюдения показывают, что в силу большой тепловой инерции ванны потери тепла через кожух ванны, в течение первых 4—5 *час* после отключения, остаются почти неизменными и они равны тепловым потерям кожуха в период нормальной работы печи. Иная картина получается с потерями через колошник. При нормальной эксплоатации печи в тигле ванны выделяется громадное количество окиси углерода. Этот газ при выходе сгорает на поверхности колошника. Благодаря этому не только исключается возможность потери энергии с поверхности колошника, но, наоборот, теплота сгорания газов частично подогревает свежую шихту, подаваемую в печь. Таким образом, в период нормальной работы печи не имеют место потери электроэнергии с поверхности колошника. Через 15—20 *мин* после отключения печи реакции в тигле и газообразование прекращаются и начинается потеря энергии с поверхности колошника. По нашим подсчетам потеря тепла с поверхности колошника для электропечи мощностью 7,5 *мгвт*, в течение первых 4—5 *час* после отключения, составляет около 400—500 *квт*. Параллельно с этим в период нормальной работы печь имеет электрические потери такого же порядка, исчезающие непосредственно с отключением печи. Таким образом, в течение 4—5 *час* после отключения печь имеет суммарные тепловые потери, равные тепловым и электрическим потерям в период ее нормальной работы. Вопрос этот подробно освещен в наших предыдущих работах [Л. 5, 6]. Эти суммарные потери во время работы печи мы назвали потерями холостого хода печи. Исследования показывают, что между мощностью и производительностью печи существует прямолинейная зависимость и прямая отсекает на оси ординат мощность холостого хода. На рис. 4 приведена типичная кривая для карбидной печи мощностью 7,5 *мгвт*. Из нее видим, что мощность потерь холостого хода этой печи составляет около 1 300 *квт*.

Базируясь на этих положениях, можно вывести зависимость между удельным расходом и часовой производительностью печи и определить допустимые ежесуточные ограничения печи в подаче электроэнергии.

Обозначим через P_x потери холостого хода печи, G часовую производительность, $W_н$ пол

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

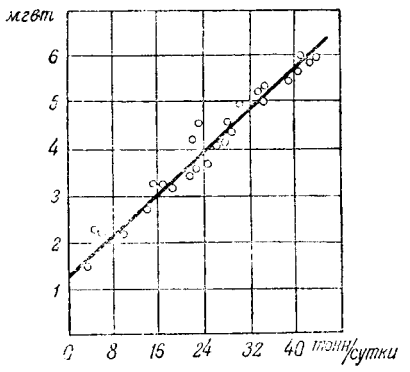

Рис. 4. Зависимость мощности электропечи (*мгвт*) от ее производительности (*т/сутки*.)

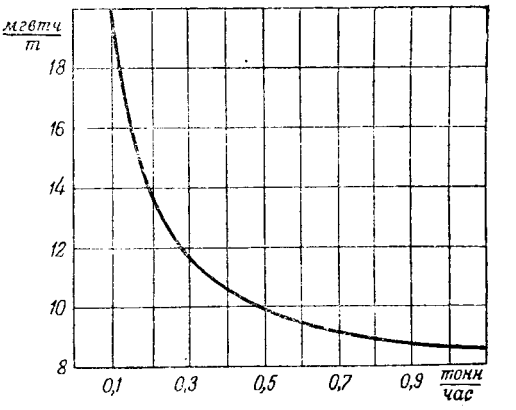

Рис. 5. Зависимость удельного расхода электроэнергии от производительности печи.

ный удельный расход энергии и W_m технологический удельный расход энергии. Эти величины связаны между собой уравнением

$$W_н = \frac{P_x}{G} + W_m. \qquad (12)$$

Так как P_x и W_m для данной печи и данного сплава величины постоянные, то между $W_н$ и G получаем гиперболическую зависимость: с увеличением производительности удельный расход энергии падает. Оно и понятно, так как с увеличением производительности уменьшается доля постоянных потерь, приходящихся на единицу продукции. Для иллюстрации на рис. 5 приведена кривая для 75-процентного ферросилиция при условии, что $P_x = 1\,300$ *квт*, а $W_m = 7\,200$ *квтч/т*. В период отключения производительность печи падает до нуля, а потери холостого хода остаются—ванна печи начинает остывать.

Эти потери должны быть покрыты после включения печи, когда будет восстанавливаться тепловой режим ванны. Чем больше будет длительность простоя, тем, разумеется, больше потребуется электроэнергии после включения печи. Поэтому в период, следующий за отключением печи, удельный расход энергии возрастает против номинального его значения.

Установим зависимость между удельным расходом энергии и длительностью простоя. Пусть при номинальной мощности печи $P_н$ и при потерях холостого хода P_x длительность ежесуточных простоев составляет t. Из общего количества электроэнергии, подводимого к печи за оставшееся время суток, часть $P_x t$ должна итти на восстановление потерь тепла в период простоя. Поэтому при номинальной норме расхода электроэнергии $W_н$ производительность печи будет:

$$G = \frac{P_н(24 - t) - P_x t}{W_н}. \qquad (13)$$

Относя общее количество подведенной к печи в течение суток энергии к этой производительности, получим действительный расход электроэнергии:

$$W = \frac{P_н(24 - t)\, W_н}{P_н(24 - t) - P_x t} \qquad (14)$$

или после преобразования получим:

$$W = \beta W_н = \frac{24 P_н W_н - P_н W_н t}{24 P_н - (P_н + P_x) t}. \qquad (15)$$

Коэффициент же загрузки определяется как отношение фактической производительности печи к номинальной. После подстановки соответствующих значений получим:

$$\gamma = \frac{24 P_н - (P_н + P_x) t}{24 P_н}. \qquad (16)$$

На рис. 6 приведены кривые удельных расходов электроэнергии и коэффициента загрузки в зависимости от длительности ежесуточного отключения печи. Номинальная мощность печи принята 6,5 *мгвт*, а потери холостого хода для первого варианта 20%, а второго—30%. Как ви-

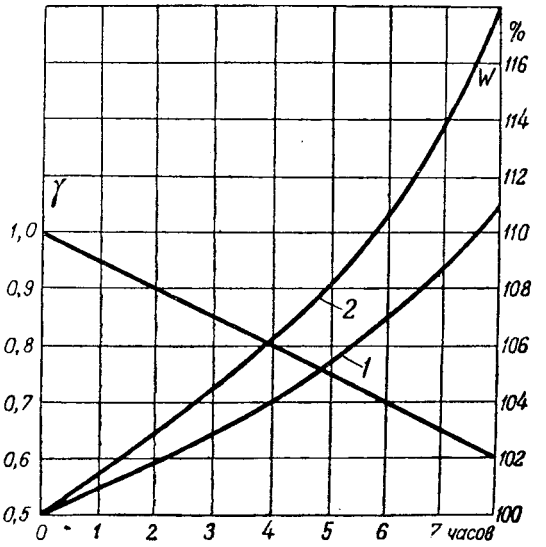

Рис. 6. Зависимость коэффициента загрузки и удельного расхода электроэнергии от длительности простоя.
1—при потерях холостого хода 20%; 2—при потерях холостого хода 30%.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

дим из кривых, с увеличением $P_к$ коэффициент β резко возрастает, а γ падает. Таким образом, с увеличением потерь холостого хода суживаются пределы рентабельности работы печи в режиме потребителя-регулятора, так как условия рентабельности требуют, чтобы γ не спускалась ниже $\gamma_{мин}$, определяемой уравнением (11).

Влияние простоев на технологический процесс. В предыдущих расчетах мы не учитывали влияние простоев на технологический процесс. Мы полагали, что после простоя работа электропечи сейчас же начинает итти нормальным ходом и что печь сразу же дает нормальную продукцию, покрывая одновременно потери за период простоя. В действительности же процесс протекает иначе.

В период простоя температура внутри печи понижается, объем тигля уменьшается и печь выходит из своего нормального режима. Поэтому печь после пуска в течение определенного промежутка времени находится в неустановившемся режиме и чем дольше был период простоя, тем дольше длится период вхождения печи в свой нормальный режим. В этот период химические процессы протекают в худших условиях и печь дает продукцию пониженного качества с большим количеством брака. Как правило, в этот период в сплавах снижается процент содержания ведущего элемента и значительная часть продукции не удовлетворяет условиям стандарта. Естественно, что в период восстановления нормального режима печь не может дать номинальной производительности и перерасход электроэнергии в суточном разрезе будет больше, чем показывают приведенные выше кривые. Поэтому в уравнения, связывающие удельный расход электроэнергии и производительность печи с длительностью простоя, должен быть введен поправочный коэффициент, учитывающий влияние технологических факторов переходного режима. К сожалению, математически оценить этот коэффициент очень трудно. Анализ статистических материалов показывает, что чем больше длительность простоя, тем резче влияние технологических факторов на перерасход электроэнергии и поправочный коэффициент представляет возрастающую функцию времени. По нашим наблюдениям при систематических ежесуточных отключениях печи на 4—5 *час* добавочный расход электроэнергии из-за расстройства технологического процесса хода печи составляет для печей мощностью 5,0 ÷ 7,5 *мгвт* около 5—6%. При дальнейшем же увеличении длительности отключения удельный расход электроэнергии возрастает весьма резко.

Допустимая длительность суточных ограничений. Вернемся теперь к экономической стороне вопроса. Выше на конкретных примерах мы видели, что даже при перерасходе электроэнергии в 10—20% существуют значительные пределы экономичности работы руднотермических печей в режиме потребителя-регулятора. В крупных энергосистемах вечерний пик нагрузки длится обычно не более 4—5 *час*. Следовательно, система может потребовать ограничения потребителя-регулятора на такой промежуток времени. С другой стороны, сами руднотермические печи из-за технологических затруднений не допускают более длительных перерывов в энергоснабжении. Таким образом, длительность ограничения работы печей на четыре часа в одинаковой степени приемлема и для энергосистемы и для руднотермических печей.

При таких ограничениях по приведенным выше кривым перерасход, связанный с тепловыми потерями печи, составит около 2—6%. С учетом технологических факторов мы можем принять полный перерасход электроэнергии около 10%, и тогда производительность печей составит около 70%.

Методы ограничения работы печей. При наличии нескольких электропечей возможны два варианта их работы. В период ограничения либо снижается мощность всех печей, либо же все ограничения относят к одной-двум печам и вовсе их отключают.

Так как потери холостого хода имеют место всегда, независимо от того, включена ли печь или отключена, а производительность печи находится в линейной зависимости от подводимой мощности, то при идентичных печах ограничение всех печей или отключение одной печи с точки зрения тепловых потерь равноценны. Но так как понижение мощности печи обычно ведет к расстройству технологического процесса, то целесообразнее, конечно, отключать одну печь, сохраняя неизменным режим работы остальных печей. Остановка одной печи более приемлема и с точки зрения ремонтов, ревизий и условий труда обслуживающего персонала.

Более благоприятными получаются условия при работе печей на форсированном режиме.

Как мы показали в одной из наших предыдущих работ [Л. 7, 8], руднотермические печи имеют значительный запас и мощность их может быть повышена на 20—30%. Если печи нормально будут работать на повышенной мощности и в период ограничений их мощность будем уменьшать на 20—30%, то ухудшение технологического процесса будет значительно меньше, чем при снижении мощности на такой же процент при существующем «номинальном» режиме.

Ферросплавная печь 7,5 *мва*, например, имеет «номинальную» мощность 6,5 *мгвт*. При работе на 5,2 *мгвт* (снижение на 20%) она дает определенный перерасход электроэнергии. Но если бы она нормально работала на мощность 7,8 *мгвт* (интенсификация на 20%) и мы бы снизили ее мощность до 6,5 *мгвт*, перерасход электроэнергии был бы меньше. Таким образом, при интенсифицированном режиме пределы рентабельности работы руднотермических печей в режиме потребителя-регулятора расширяются.

Заключение. Вопрос об оптимальном режиме энергосистемы и руднотермических печей должен решаться комплексно с общей народнохозяйственной точки зрения. Технико-экономические расчеты показывают полную целесообразность

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

работы руднотермических печей в режиме потребителя-регулятора. Сезонное регулирование системы, когда печи приходится ставить в резерв на более или менее длительный срок, особых технических затруднений не вызывает. Пределы же допустимых минимальных коэффициентов загрузки легко определяются соответствующими расчетами.

Руднотермические печи могут работать в режиме регулятора энергоснабжающей системы и в суточном разрезе. Однако при такой эксплоатации мы вынуждены задавать печам периодические нестационарные режимы, что приводит к дополнительной затрате электроэнергии и создает затруднения в технологическом процессе.

Несмотря на то, что нестационарный режим руднотермических печей изучен слабо, мы все же имеем достаточно материалов для определения допустимых пределов рентабельности работы печей в режиме суточного регулятора. Для ферросплавных и карбидных печей ежесуточные отключения до 4 *час* вполне допустимы и не создают технически непреодолимых трудностей. Однако допустимые пределы ограничения в подаче энергии должны быть определены в каждом случае в отдельности. Интенсификация электропечей облегчает условия работы их в режиме потребителя-регулятора.

В настоящей статье освещена проблема работы в режиме потребителя-регулятора руднотермических печей. Предварительные расчеты показывают, что не с меньшим, а, пожалуй, даже с большим эффектом могут быть использованы в качестве регуляторов системы мощные сталеплавильные печи. Но для решения этой проблемы требуется специальное исследование.

Литература

1. С. А. Кукель-Краевский. Технико-экономические основы планирования потребителей-регуляторов нагрузки. Известия ЭНИН, т. 3, стр. 101, 1935.
2. М. Л. Элькинд. Потребители-регуляторы электрической нагрузки в энергосистеме. ОНТИ, 1935.
3. Т. Л. Золотарев. К экономическому расчету потребителей-регуляторов сезонной гидроэнергии. Известия ЭНИН, т. 3, стр. 147, 1935.
4. А. М. Осепян Карбидные и ферросплавные электропечи, как потребители сезонной гидроэнергии. Электричество, № 8, 1949.
5. Г. А. Сисоян. Оптимальный режим мощных ферросплавных печей. Диссертация ГПИ, 1940.
6. Г. А. Сисоян, Потери холостого хода мощных руднотермических печей. Труды ГИИ, № 1 (15), 1943.
7. Г. А. Сисоян. Интенсификация руднотермических печей. Груз. отд. ВНИТОЭ, 1944.
8. Г. А. Сисоян. Оптимальная мощность и производительность руднотермических печей. Сталь, № 5, 1949.
9. И. Вочке. Электрическая плавильная печь. ОНТИ, 1936.

[3. 5. 1950]

◇ ◇ ◇

Тепловозостроение за 25 лет

Кандидат техн. наук, доц. А. Д. СТЕПАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Освещается развитие и современное состояние тепловозостроения. Отмечается, что в Советском Союзе — родине поездных тепловозов — уже при возникновении дизельной тяги был намечен правильный путь развития тепловозной тяги. Рассматриваются важнейшие задачи современного тепловозостроения. Основное внимание уделено электрической передаче.

Основные этапы развития. В 1949 г. исполнилось 25 лет со времени постройки в СССР первого в мире мощного тепловоза с электрической передачей. За короткий период своей истории дизель-электрическая тяга нашла применение в различных областях наземного транспорта. Быстроходные обтекаемые дизель-поезда используются для экспрессного пассажирского сообщения. Тепловозы широко применяются для грузового и пассажирского движения, для маневровой службы и для промышленного транспорта. Автомотриссы находят применение в местном и пригородном сообщении. Мощные дизель-электрические автобусы применяются в городском, пригородном и междугороднем транспорте. Наряду с электрической тягой, дизель-электрическая тяга является одним из важнейших средств реконструкции советского железнодорожного транспорта.

Советский Союз является родиной тепловозов. Первая попытка постройки тепловоза 1 000 *л. с.*, начатая в 1906 г. в Германии, окончилась провалом: после шести лет работы над этим тепловозом он оказался непригодным для эксплоатации и был продан на слом. В России в это время проблемы тепловозной тяги разрабатывались русскими учеными В. И. Гриневецким, А. Н. Шелестом, Б. М. Ошурковым и др. На Коломенском заводе и на Ташкентской железной дороге были разработаны проекты тепловозов. В 1909 г. был построен опытный дизель по оригинальной системе, предложенной В. И. Гриневецким (в 1921 г. дизель такой системы был построен в США под названием дизеля Сперри без какой-либо ссылки на В. И. Гриневецкого). В условиях царской России не удалось построить ни одного тепловоза. Но ни неудача немецкого тепловоза, ни препятствия

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

со стороны царских чиновников не смущали передовых русских ученых. Вот что писал в 1915 г. В. И. Гриневецкий о работе в области тепловозов: «Западная техника... не достигла еще практического решения задачи... В этом вопросе русская техника, не глядя особенно на Запад, должна проявить свою инициативу и должна сама справиться со всеми трудностями. При таком взгляде на дело... эта задача будет разрешена и проведена в жизнь русской техникой скорее и шире, чем при выжидании и затем следовании за готовыми западными образцами».

Первая мировая война прекратила дальнейшие работы по тепловозам и предсказание В. И. Гриневецкого осуществилось полностью впервые в Советском Союзе. 4 января 1922 г. Совет Труда и Обороны принял постановление, в котором указывается, что введение тепловозов имеет особо важное значение для оздоровления теплового хозяйства железных дорог и разрешения топливного вопроса. Этим постановлением было поручено Теплотехническому институту организовать эскизную разработку проектов и технических условий для тепловозов и был объявлен конкурс на выработку наилучшей конструкции тепловозов с уплатой премии в общей сумме 1 000 000 руб. золотом.

За границей были заказаны по проектам советских специалистов три тепловоза мощностью 1 200 *л. с.* с различными передачами: электрической, газовой — по системе А. Н. Шелеста и гидравлической, из которых тепловоз с электрической передачей Э-Эл-2 был выполнен, второй, с газовой передачей, не доведен до конца, а взамен тепловоза с гидравлической передачей был построен по проекту советских инженеров тепловоз Э-Мх-3 с механической передачей. Но «первенцем» мощных тепловозов был тепловоз Щ-Эл-1 мощностью 1 000 *л. с.*, построенный в Советском Союзе. Этот тепловоз был разработан специальным Бюро под руководством Я. М. Гаккеля при участии виднейших советских ученых и специалистов: Б. М. Ошуркова, А. С. Раевского, А. В. Вульфа, В. Ф. Миткевича, М. А. Шателена, Г. О. Графтио, Н. Л. Щукина, А. Е. Алексеева и др. Тепловоз был построен Балтийским судостроительным и механическим заводом в кооперации с заводами «Красный Путиловец» и «Электрик» [1]. 5 августа 1924 г. тепловоз впервые вышел из мастерских на заводские рельсовые пути, и 6 ноября 1924 г. сдан в эксплоатацию на Октябрьскую железную дорогу. В Бюллетене Тепловозной комиссии [Л. 4] указывается: «6 ноября 1924 г. следует отметить, как дату первого движения 1 000-сильного тепловоза с электрической передачей по рельсовым путям магистральных железных дорог». Этой датой открывается история советского и тем самым мирового тепловозостроения, так как тепловоз Щ-Эл-1 был первым в мире работоспособным поездным тепловозом. Конструкция тепловоза Щ-Эл-1 содержала в себе основные прогрессивные элементы, характерные для современных тепловозов: тележечную конструкцию ходовых частей, бескомпрессорный дизель, электрическую передачу мощности от дизеля к колесам, индивидуальный привод движущих осей, электрический запуск дизеля от аккумуляторной батареи.

Советский Союз в первые же годы своего существования, еще не ликвидировав всех последствий первой мировой войны и интервенции, разрешил, таким образом, труднейшую техническую задачу, оказавшуюся не по силам капиталистическим странам. Характерно, что в США первый тепловоз появился в 1925 г. и имел мощность всего 300 *л. с.*, самый мощный тепловоз в Западной Европе, построенный в 1924 г., был мощностью 440 *л. с.* Первые тепловозы, построенные по проектам советских ученых и инженеров частью за границей, частью в Советском Союзе, были подвергнуты глубоким и всесторонним испытаниям, положившим начало изучению тепловозов и давшим материалы, на которых основывалось проектирование тепловозов у нас и за границей. После решения Июньского пленума ЦК ВКП(б) в 1931 г., наметившего план развития электрической и тепловозной тяги, советская промышленность приступила к изготовлению серии товарных тепловозов Э-Эл типа 2-5-1 мощностью 1 050 *л. с.* В том же году начался перевод на тепловозную тягу одного из участков Ашхабадской железной дороги. Участок явился первым в мире железнодорожным участком, переведенным целиком на тепловозную тягу. В настоящее время переведены на тепловозную тягу также участки Орджоникидзевской, Оренбургской и других железных дорог.

Промышленностью налажено серийное производство тепловозов ТЭ1 типа C_0-C_0 мощностью 1 000 *л. с.* С текущего года промышленность приступила к производству более мощного сдвоенного тепловоза ТЭ2 с формулой $B_0 - B_0 + B_0 - B_0$, мощностью 2 000 *л. с.* Ведется также работа по разработке нового более совершенного мощного тепловоза.

Следует особо отметить, что только в Советском Союзе были с самого начала правильно намечены и осуществлены основные пути развития тепловозной тяги. С этой точки зрения представляется интересным сравнить, как решались основные вопросы тепловозной тяги у нас и за границей.

1. Во всех капиталистических странах применение дизеля для тяги началось с постройки тепловозов и автомотрисс небольшой мощности для маневровой работы, промышленного транспорта и местного пассажирского сообщения. Многие годы применение тепловозной тяги (если не считать отдельных опытных тепловозов) ограничивалось указанными вспомогательными областями работы железнодорожного транспорта. Только в Советском Союзе уже первые тепловозы строились для решающей области работы железных дорог — грузового движения. Жизнь показала правильность принятого у нас направления, и другие страны со значительным опозданием по-

[1] Более подробно история этого тепловоза изложена в статье Е. Я. Гаккель [Л. 1].

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

шли по нашему пути. В США в 1936 г. был выпущен первый пассажирский тепловоз, и только с 1940 г. началась постройка грузовых тепловозов.

В Европе серийное производство поездных тепловозов началось только после второй мировой войны (Англия).

2. Работы по тепловозостроению в СССР начались с разработки, постройки и исследования различных конструкций, с различными видами передачи мощности. В результате проведенной опытной работы были приняты для серийного производства тепловозы с электрической передачей. Именно это решение обеспечило дальнейший успех тепловозной тяги. В настоящее время все поездные тепловозы в мире (за исключением отдельных экспериментальных тепловозов) имеют электрическую передачу. В то же время в СССР продолжаются исследовательские работы по другим видам передачи. Ни в одной другой стране столь широко работы не проводились и, повидимому, не ведутся.

3. Одновременно с началом серийной постройки тепловозов Советское правительство приняло в 1931 г. решение о переводе остальных участков Ашхабадской железной дороги на сплошную тепловозную тягу.

Такой метод применения тепловозов — перевод отдельных участков на обслуживание только тепловозами с последующим расширением участков по мере увеличения количества тепловозов — был принят и в дальнейшем и полностью себя оправдал. Только при таком принципе освоения тепловозной тяги могли быть выявлены все преимущества тепловозов, налажена эксплоатация и обслуживание и накоплен необходимый опыт. За границей практиковался другой метод, при котором поездные тепловозы обслуживают отдельные поезда и работают в эксплоатации параллельно с паровозами. Только с 1942 г., с опозданием на 10 лет, в США начали переводить участки железных дорог целиком на тепловозную тягу.

4. В Советском Союзе тепловоз никогда не рассматривался как конкурент паровозу или электровозу. Тепловозная тяга, как и другие виды тяги, вводится по продуманному плану там, где она технически и экономически более целесообразна в интересах народного хозяйства. Ведущая роль в перспективе отводится электрической тяге.

В капиталистических странах, где господствует конкуренция и интересы частных фирм, развитие различных видов тяги имеет уродливый характер. В Европе дизельная тяга развита слабо даже там, где она целесообразна. В США тепловозная тяга за последние годы не только резко сокращает применение паровой тяги, но практически приостановила развитие такого прогрессивного вида тяги, как электрическая.

Боязнь американских железнодорожных компаний вкладывать крупные капиталы в электрификацию железных дорог под угрозой надвигающегося кризиса, ненормально высокие цены на электроэнергию, установленные энергетическими монополиями, привели к тому, что на тепловозную тягу переводятся участки, которые с точки зрения общегосударственных интересов следовало бы электрифицировать. Заказанные в 1947 и 1948 г. три электровоза предназначены для промышленного транспорта. Железные дороги за эти годы не заказали ни одного электровоза.

Дизели. Дизель вместе с вспомогательными устройствами — холодильником, вентилятором, насосами и т. п., представляет наиболее громоздкую часть оборудования, которая в основном определяет габариты и вес тепловоза. Весьма важно повысить мощность дизеля на единицу веса его. Эффективным средством является повышение скорости вращения. Однако при больших мощностях это приводит к увеличению средней скорости поршня, что уменьшает срок службы и понижает надежность работы. Поездной тепловоз работает почти круглосуточно в течение года.

В условиях магистрального движения всякая неисправность, которая не может быть устранена силами машиниста или его помощника, приводит к срыву графика движения. Ущерб, который наносится при этом железнодорожному транспорту и народному хозяйству, очень велик. Поэтому долговечность и надежность работы оборудования поездного тепловоза имеет решающее значение. В современных тепловозах применяются дизели средней быстроходности со скоростью $n = 700 - 1\,000$ *об/мин* при мощности 1 000—2 000 *л. с.* Наиболее целесообразным средством повышения удельной мощности является применение наддува — нагнетание воздуха в цилиндры дизеля под давлением. Это мероприятие позволяет повысить удельную мощность дизеля на 50—80% при относительно небольшом усложнении оборудования (добавление нагнетателя и улучшение охлаждения дизеля). Применение двухтактных дизелей также повышает удельную мощность. Современные тепловозные дизели, как четырехтактные с наддувом, так и двухтактные, имеют вес на единицу эффективной мощности 8—12 *кг/л. с.* вместо 25—30 *кг/л. с.* дизелей, примененных на первых тепловозах.

Передачи. Дизель по своей характеристике не отвечает условиям, предъявляемым к тяговому двигателю. Паровая машина и электродвигатель обеспечивают автоматическое изменение силы тяги локомотива при изменении профиля пути и развивают максимальную силу тяги при пуске. Дизель при непосредственном соединении с движущими колесами не создает никакого усилия при трогании и не обеспечивает практически изменения силы тяги при изменении сопротивления движению. Много лет пытаются придать дизелю более эластичную характеристику (Гриневецкий, Ансальдо, Стилл). В СССР ведутся работы по тепловозам непосредственного действия (Хлебников, Майзель). До сего времени эта задача не получила практического разрешения. Поэтому необходимым элементом тепловоза в настоящее время является передача с переменным передаточным отношением: механическая, гидродинамическая, газовая или электрическая. Механическая передача, широко применяемая в автомобилях

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

и тракторах, находит применение в автомотрисах и тепловозах малой мощности. Для поездных тепловозов, как показал опыт Э-Мх-3, она неудовлетворительна в связи с резкими изменениями силы тяги при переключении и, недостаточным использованием мощности дизеля. Гидродинамическая передача применяется в дизель-поездах и тепловозах небольшой мощности, но диапазон изменения силы тяги, который она может обеспечить, недостаточен. Лучшие шансы на успех имеет гидромеханическая передача, представляющая комбинацию планетарной зубчатой передачи с гидродинамической, однако в условиях работы поездного тепловоза этот тип передачи еще не получил распространения и целесообразность применения ее для мощных тепловозов не проверена.

Практически все современные поездные тепловозы выполняются с электрической передачей постоянного тока. Основными преимуществами электрической передачи в сравнении с другими являются: а) полное использование мощности дизеля независимо от условий движения; б) наиболее широкий диапазон возможного изменения силы тяги и скорости движения, причем это изменение не требует каких-либо манипуляций машиниста; в) плавный и быстрый разгон поезда; г) надежная и экономичная работа дизеля, режим которого не зависит от условий движения; д) долговечность; е) простота и крайняя легкость управления.

Существенным недостатком электрической передачи являются большие габариты, вес и стоимость. Габариты тепловоза ограничены; увеличение габаритов передачи приводит к уменьшению установленной мощности оборудования и тем самым к ограничению мощности тепловоза. Поэтому для тепловозов с электрической передачей особенно важно уменьшение габаритов и веса дизеля, передачи и других элементов на единицу мощности.

Генераторы и тяговые электродвигатели. Дизель и рама, на которой он укреплен, занимают по высоте значительное место. Для сохранения общей допустимой высоты локомотива в поездных тепловозах применяют в отличие от электровозов и паровозов колеса малого диаметра, приблизительно 1 000—1 060 *мм*. За последние 10 лет мощность тепловоза увеличилась в 1,5—2 раза, но диаметр их колес не изменился. При принятой для тепловозных электродвигателей подвеске «трамвайного» типа поперечные габариты двигателя определяются в основном диаметром колеса. Поэтому тепловозные двигатели должны иметь габариты, значительно меньшие, чем допускаются для электровозов и даже для моторных вагонов.

Мощность тепловозного двигателя при длительном номинальном режиме

$$P_д = 2{,}73 \cdot 10^{-3} F_д v_д = \frac{P_e \eta_n}{z},$$

где $F_д$ — длительная сила тяги двигателя, *кг*;
$v_д$ — скорость длительного режима, *км/ч*;
P_e — мощность, передаваемая дизелем генератору, *квт*;
η_n — к. п. д. электрической передачи;
z — число тяговых двигателей.

Габариты тепловозного двигателя не определяются только длительным режимом, они зависят также от диапазона регулирования скорости, хотя мощность при этом регулировании остается постоянной. Размеры активной части двигателя определяются в основном величиной, которую можно условно назвать «объемной мощностью»:

$$P_д = P_д \frac{v_{макс}}{v_д} = 2{,}73 \cdot 10^{-3} F_д v_{макс}.$$

Как показывают расчеты, объем активной части и вес тягового двигателя при одинаковых расчетных нагрузках приблизительно пропорциональны величине «объемной мощности». Это обстоятельство следует учитывать при выборе тяговых параметров тепловоза. Универсальность локомотива — пригодность его для различных видов службы: пассажирской, грузовой, передаточной, маневровой,— является ценным эксплоатационным качеством. Тепловоз с электрической передачей проще, чем любой другой тип локомотива, он может быть выполнен универсальным. Однако это ведет к увеличению веса тяговых двигателей и, как будет видно ниже, генератора. Прекрасным примером может служить советский тепловоз ТЭ1, который используется для ведения грузовых поездов весом 1 200—1 500 *т*, и с успехом применяется для ведения пассажирских и скорых поездов, заменяя паровозы в 2—3 раза большей мощности. Он является также наилучшим локомотивом для маневровой и передаточной работы. Эта универсальность достигнута главным образом за счет того, что в тепловозе ТЭ1 общий вес двигателей, отнесенный к мощности дизеля, составляет 15 *кг/л. с.*, между тем, как современные пассажирские тепловозы имеют вес двигателей на единицу мощности дизеля 5—7 *кг/л. с.*, грузовые 6—8 *кг/л. с.* и маневровые 9—11 *кг/л. с.* При проектировании новых тепловозов следует тщательно выбирать тяговые параметры: длительную силу тяги, длительную скорость, максимальную скорость с тем, чтобы сочетать требуемые эксплоатационные характеристики с минимальным весом электрооборудования.

Современные тяговые двигатели являются высоко использованными машинами. В качестве критерия использования габаритов может служить величина его объемной мощности на единицу веса. Часто применяемые для оценки двигателей номинальная мощность или номинальный крутящий момент на единицу веса в меньшей степени пригодны для сравнения тяговых двигателей, так как они не учитывают влияния диапазона регулирования скорости.

Только за последние 9—10 лет вес на единицу объемной мощности тепловозных двигателей по-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

низился на 27% — с 3,5 до 2,6 *кг/квт*, а с момента появления первого тепловоза он уменьшился в три раза, с 7,7 до 2,6 *кг/квт*. Основными факторами снижения удельного веса были: повышение быстроходности, интенсивности охлаждения тяговых двигателей, применения подшипников качения и других конструктивных улучшений. Известную роль сыграло улучшение применяемых материалов и технологии. Для дальнейшего повышения удельной мощности необходимо в первую очередь повышение качества материалов и технологии: снижение потерь в электротехнической стали, резкое улучшение качества щеток и подшипников качения, повышение теплостойкости изоляционных лаков, замазок и других изоляционных материалов, увеличение механической и электрической прочности изоляции при снижении ее толщины и т. п.

Мощность генератора равна мощности дизеля за вычетом мощности вспомогательных механизмов и потерь в генераторе.

Габариты генератора определяются номинальной мощностью, а также диапазоном регулирования напряжения и тока. Как и для двигателя, для генератора можно ввести понятие объемной мощности. За последнее десятилетие вес генератора на единицу объемной мощности снизился с 3,6 *кг/квт* до 2,25 *кг/квт*, т. е. на 28%, а с 1925 г. почти в 6 раз (с 12,9 до 2,25 *кг/квт*). Вопросы зависимости габаритов генератора и двигателей от диапазона регулирования были глубоко проанализированы в советских работах (кандидатская диссертация Н. А. Болдова, научно-исследовательские работы кафедры Электролокомотивостроения МЭИ, работы ЦНИИ МПС и др.) ранее, чем в заграничной литературе. Диапазон регулирования генератора связан с диапазоном регулирования тяговых двигателей и схемой их включения. Изменение силы тяги и скорости требует соответствующего изменения тока и напряжения генератора. Применение последовательно-параллельного переключения и ослабления поля двигателей, как видно из дальнейшего, позволяет сократить диапазон регулирования генератора при неизменных тяговых параметрах тепловоза.

Регулирование дизель-генератора. Основной целью регулирования генератора в тепловозе является использование полной мощности дизеля для тяги при всех тех условиях движения, когда это использование возможно. Для того, чтобы регулирование постоянной мощности дизель-генератора не зависело от внимания и опытности машиниста и для упрощения управления тепловозом, оно осуществляется автоматически. Переменной величиной является ток генератора, изменяющийся в соответствии с изменением условий движения. Регулируемой величиной является напряжение генератора, которое должно изменяться приблизительно обратно пропорционально току (если пренебречь потерями в генераторе). Наиболее просто осуществить автоматическое регулирование генератора путем подбора такой схемы его возбуждения, при которой магнитный поток Ф генератора резко изменяется со скоростью вращения дизель-генератора. Это может быть получено при шунтовом возбуждении генератора (со слабым компаундированием) или возбуждении от возбудителя, приводимого от вала дизель-генератора (с добавлением встречной сериесной обмотки). Внешняя характеристика генератора при постоянной скорости вращения получается выпуклой (кривая *1* рис. 1) и в пределах от $I_{мин}$ до $I_{макс}$ лежит выше кривой *2*, соответствующей постоянной мощности дизеля. Перегрузка дизеля генератором приводит к уменьшению скорости вращения и, следовательно, магнитного потока генератора до величины, при которой наступает равновесие. Кривая *3* (рис. 1) изображает характеристику генератора при совместной работе его с дизелем, а кривая *4*—скорость вращения дизеля в зависимости от тока генератора. Генератор (вместе с возбудителем, если он применяется) выполняет функцию регулятора скорости вращения дизеля. Регулирование является статическим: каждому значению переменной величины тока нагрузки *I* соответствует определенное значение скорости вращения *n*. Точность регулирования определяется главным образом характером зависимости $\Phi = f(n)$ и формой внешней характеристики генератора, зависящей в свою очередь от насыщения магнитной цепи. Чем меньше насыщена магнитная цепь генератора, тем менее выпукла характеристика его и тем меньше отклонение скорости вращения от максимального значения. Регулирование становится также тем более точным, чем больше величина $\Phi'(n) = \frac{\partial \Phi}{\partial n}$.

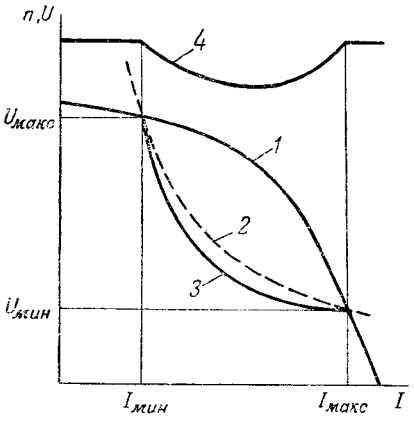

Рис. 1.

Максимальное отклонение скорости вращения при автоматическом регулировании такого рода достигает 15—30%. Указанные системы применяются в экипажах с быстроходными дизелями малой мощности, так как мощность их относительно мало падает с понижением скорости вращения и в таких экипажах простота схемы играет более важную роль, чем степень использования дизеля. Система с компаундированным шунтовым генератором применена, в частности, в дизель-электрическом автобусе ЗИС-154.

Вторая группа систем автоматического регулирования характеризуется применением регулирующих аппаратов. Одна из схем с астатическим регулятором, применяемая на современных тепло-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

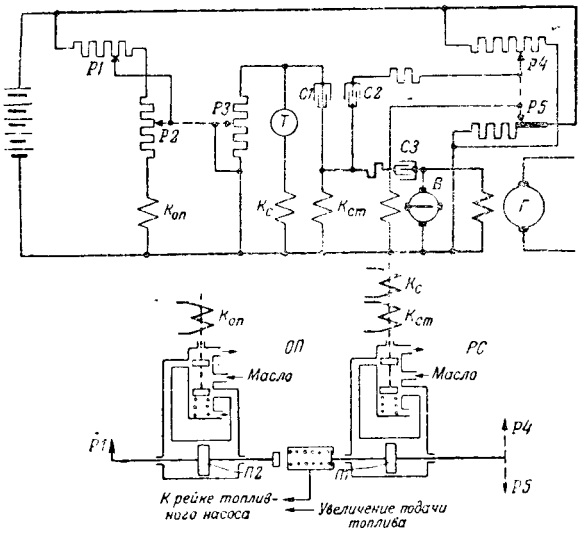

Рис. 2.

возах, изображена на рис. 2. Обмотка возбуждения тягового генератора *Г* питается от возбудителя поперечного поля *В*. Обмотка возбуждения возбудителя присоединена посредством контактного рычага *Р5* к потенциометру, включенному на постоянное напряжение. Рычаг *Р5* является исполнительным органом электрогидравлического регулятора, упрощенная схема устройства которого показана в нижней части рис. 2. Регулятор состоит из двух частей: регулятора скорости вращения *РС* и устройства для ограничения подачи топлива *ОП*. Каждый состоит из золотника с электромагнитным управлением и гидравлического сервопривода. Рабочая катушка k_c регулятора *РС* включена через реостат на зажимы тахометрического генератора *Т*, приводимого от дизеля. При установившемся режиме дизель-генератора золотник перекрывает отверстия, ведущие к сервоприводу, и поршень *П1* неподвижен. При всяком изменении скорости вращения золотник открывает доступ масла под давлением в сервопривод и поршень *П1* перемещается в ту или другую сторону. Поршень *П1* соединен механически с контактным рычагом *Р5* и через пружину с рычагом, связанным с рейками топливных насосов. При максимальном возбуждении возбудителя *В* (и, следовательно, генератора *Г*) регулятор *РС* изменяет подачу топлива, поддерживая скорость вращения дизель-генератора постоянной.

При максимальной подаче топлива, определяемой положением упора, соединенного механически с поршнем *П2*, регулятор *РС* изменяет возбуждение генератора, попрежнему сохраняя постоянной скорость вращения дизель-генератора. При любом положении поршня *П1* установившийся режим дизель-генератора возможен лишь, когда золотник находится в положении перекрыши. Этому положению соответствует определенный ток катушки K_c и, следовательно, определенная скорость вращения дизель-генератора (если пренебречь неучвствительностью регулятора). Таким образом, регулятор *РС* является астатическим и нуждается в стабилизирующих устройствах. В схеме применена электрическая стабилизация посредством стабилизирующей катушки $K_{ст}$ и конденсаторов *С1*, *С2* и *С3*. Конденсатор *С1* ускоряет начало регулирования. Конденсатор *С2* является обратной связью измерительного органа — золотника с сервоприводом (посредством контактного рычага *Р4*, соединенного с поршнем *П1*). Конденсатор *С3* представляет обратную связь золотника с возбудителем. Все эти связи являются гибкими, они действуют только в процессе изменения соответствующих величин и их действие зависит от скорости изменения этих величин. При установившемся режиме ток катушки $k_{ст}$ равен нулю.

Контактный рычаг реостата *Р3* соединен механически с рукояткой контроллера машиниста и служит для изменения числа оборотов, поддерживаемого регулятором *РС*.

Устройство для ограничения подачи представляет собой следящий привод. Катушка золотника $K_{оп}$ включена на постоянное напряжение последовательно с двумя реостатами. Контактный рычаг реостата *Р2* связан с рукояткой контроллера машиниста, контактный рычаг реостата *Р1* соединен с поршнем *П2* сервопривода. При изменении положения рукоятки контроллера положение упора, ограничивающего подачу топлива, изменяется так, что с уменьшением числа оборотов дизеля уменьшается максимальная подача топлива.

Описанная схема регулирования может обеспечить высокую точность регулирования. Серьезный недостаток ее для применения в тепловозах заключается в том, что разрегулировка схемы, неисправность какого-нибудь из элементов схемы (конденсатора, контакта и т. п.) могут повлечь за собой срыв графика движения. В условиях работы поездного тепловоза, обслуживаемого только машинистом и его помощником и оторванного от базы с квалифицированным персоналом, желательна повышенная надежность схемы и оборудования и более простая возможность устранения неисправностей.

Рассмотренные выше группы схем являются системами замкнутого автоматического регулирования, поддерживающими скорость вращения дизеля на приблизительно постоянном уровне. Изменение магнитного потока является в этих схемах результатом отклонения скорости вращения.

Однако возможно осуществить автоматическое регулирование путем изменения магнитного потока в непосредственной зависимости от тока нагрузки, т. е. путем подбора определенной зависимости $\Phi = f(I)$. На этом основана работа третьей группы систем регулирования, которые можно назвать системами с гиперболической характеристикой генератора. В этих системах применяются возбудители специальной конструкции, устроенные так, что магнитный поток генератора (а следовательно, и э. д. с. его при $n = \text{const}$) изменяется обратно пропорционально току *I*. Примером такой схемы является

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

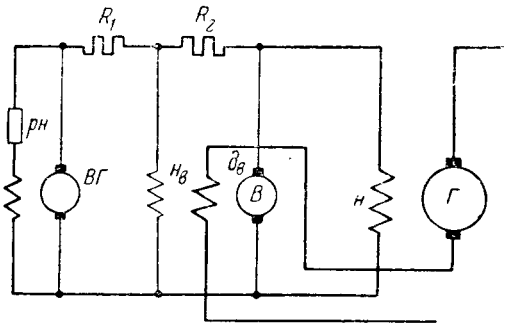

Рис. 3.

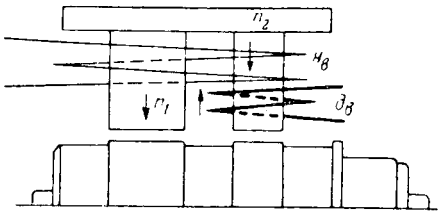

Рис. 4.

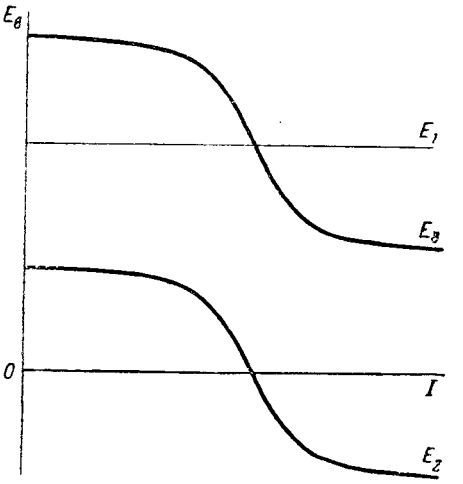

Рис. 5.

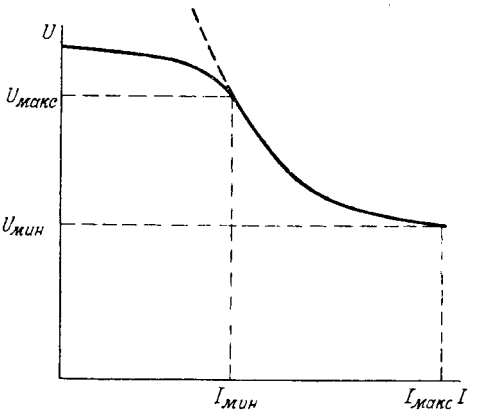

Рис. 6.

схема регулирования генератора тепловоза ТЭ1, изображенная в упрощенном виде на рис. 3. В схеме применен возбудитель с расщепленными полюсами (рис. 4), имеющий независимую обмотку $н_в$, охватывающую весь полюс и дифференциальную обмотку $д_в$, помещенную на выполняемую насыщенной часть полюса и обтекаемую током нагрузки генератора. Электродвижущая сила $E_в$ возбудителя может быть представлена, как алгебраическая сумма э. д. с. E_1, создаваемой потоком ненасыщенной части n_1 полюса, и э. д. с. E_2, создаваемой потоком, охватываемым обмоткой $д_в$. На рис. 5 изображены кривые зависимости E_1, E_2 и $E_в$ от тока нагрузки генератора. Электродвижущая сила E_1, если пренебречь влиянием реакции якоря и изменением потока рассеяния, не зависит от тока генератора и представлена горизонтальной прямой. Электродвижущая сила E_2 совпадает по знаку с E_1, когда преобладает действие независимой обмотки, и меняет знак, когда число ампервитков дифференциальной обмотки (пропорциональное току генератора) становится больше числа ампервитков независимой обмотки и магнитный поток в части полюса, охватываемой обмоткой $д_в$, меняет направление.

Внешняя характеристика генератора с подобным возбудителем может быть получена весьма близкой к характеристике постоянной мощности при токе больше $I_{мин}$ (рис. 6).

Система регулирования магнитного потока генератора в зависимости от тока является разомкнутой системой статического регулирования. Для обеспечения устойчивой работы дизель-генератора она должна быть дополнена либо центробежным регулятором, изменяющим подачу топлива в соответствии с нагрузкой генератора, либо установлением зависимости $\Phi = f(n)$, аналогично системам первой группы, что приводило бы к равновесию при изменении скорости вращения при недогрузке или перегрузке. Обычно применяются оба метода одновременно. Системы такого рода отличаются высокой надежностью работы и удовлетворительной точностью регулирования. Недостатком их является изменение мощности дизеля вследствие изменения температуры обмоток генератора и возбудителя, изменения мощности вспомогательных механизмов, изменения напряжения источника питания цепи возбуждения возбудителя и т. п., а также относительно узкий диапазон изменения нагрузки, при котором мощность дизеля поддерживается близкой к постоянной.

Точность и диапазон регулирования могут быть повышены применением дополнительного регулирующего аппарата, изменяющего возбуждение возбудителя при изменении скорости вращения.

Системы регулирования с гиперболической характеристикой генератора и дополнительным регулирующим аппаратом представляются наиболее рациональными для поездных тепловозов. Ближайшими задачами в этой области являются усовершенствование конструкции возбудителя и системы дополнительного регулирования.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Управление тяговыми двигателями. Последовательно-параллельное переключение двигателей и ослабление их возбуждения применяются в тепловозах, как указывалось выше, для уменьшения диапазона регулирования генератора. Регулирование скорости движения поезда от величины, соответствующей максимальной силе тяги, до максимальной скорости (при полной мощности дизеля) возможно при постоянном соединении двигателей за счет изменения напряжения от $U_{мин}$ до $U_{макс}$ (рис. 6). Если при токе $I = \frac{I_{макс}}{2}$ произвести переключение, например, с последовательного соединения четырех двигателей на последовательно-параллельное, то после переключения ток генератора увеличится вдвое, напряжение генератора вдвое понизится при практически неизменных токе и напряжении на зажимах тягового двигателя. Дальнейшее повышение напряжения двигателей может быть осуществлено увеличением напряжения без превышения величины $U_{макс}$. Подобным же образом можно уменьшить диапазон регулирования путем применения ослабления возбуждения двигателей.

Если число двигателей тепловоза равно четырем, то при любом варианте переключений диапазон регулирования генератора получается равным для рабочих режимов около двух. Иногда вводят на первой группировке ослабление поля и производят затем переключение двигателей на следующую группировку с полным полем. Это позволяет сократить диапазон регулирования генератора до

$$\frac{U_{макс}}{U_{дл}} = 1{,}5 \div 1{,}6.$$

При шести двигателях на тепловозе возможно ограничить диапазон регулирования значением 1,5.

Применяются также двигатели с глубоким ослаблением поля (до $\alpha = 0{,}25—0{,}35$). В этом случае последовательно-параллельное переключение тяговых двигателей обычно не применяется, а ослабление поля осуществляется двумя ступенями. Схема при этом значительно упрощается.

При такой схеме диапазон регулирования генератора получается еще уже:

$$\frac{U_{макс}}{U_{дл}} = 1{,}4 \div 1{,}5.$$

Выбор схемы переключений в цепи двигателей определяется главным образом требуемым диапазоном регулирования скорости тепловоза.

Ближайшие задачи. В настоящее время тепловозная тяга в СССР применяется главным образом на линиях с относительно малыми грузопотоками, где не требуются локомотивы большой мощности. Тепловозы ТЭ1 и ТЭ2 в значительной мере удовлетворяют условиям эксплоатации этих линий. Однако намеченный план перевода железных дорог на тепловозную тягу захватывает и линии с большими грузопотоками и тяжелыми составами поездов. Разработка нового типа более мощного грузового тепловоза является одной из важнейших задач тепловозостроения. Вполне реальной задачей является разработка тепловоза с дизелем 2 000 *л. с.* в одной секции при ограничении давления оси величиной не более 21 *т*. Это потребует значительного снижения веса тепловоза. Имеются все данные полагать, что наша промышленность с этой задачей справится успешно в ближайшее время и поведет работу над дальнейшим повышением мощности тепловоза.

Повидимому, нецелесообразно разрабатывать самостоятельную конструкцию пассажирского тепловоза, так как его можно легко получить из грузового путем изменения зубчатой передачи между тяговыми двигателями и колесами. Важной задачей является разработка серии маневровых и промышленных тепловозов. Работу в этом направлении ведет ЦНИИ МПС. Тепловоз ТЭ1 мощностью 1 000 *л. с.* может быть вполне успешно применен для тяжелой маневровой работы. Разработан тепловоз с механической передачей (мотовоз) мощностью 150 *л. с.* Однако нужны промежуточные мощности порядка 300 и 600 *л. с.* Целесообразно ввести быстроходные дизельпоезда для пассажирского сообщения между основными центрами и автомотриссы для пригородного и местного сообщения на линиях с небольшими пассажиропотоками, где электрическая тяга не оправдывает себя.

Для мощных поездных тепловозов применение электрической передачи в настоящее время является бесспорным, и трудно ожидать пересмотра этого вопроса, если только не будут существенно изменены характеристики дизеля. Более спорным является вопрос о передаче для тепловозов и дизельпоездов мощностью 600 *л. с.* и меньше. Тепловозное отделение ЦНИИ МПС выбрало для маневровых тепловозов средней мощности гидромеханическую передачу.

Безусловно, следует спроектировать и построить опытные тепловозы с гидромеханической передачей. Однако эффективность и надежность работы гидромеханической передачи тепловозов, в особенности для тяжелых климатических условий Советского Союза, требует проверки и сравнения ее с электрической передачей. Было бы правильным построить опытные тепловозы одинаковой мощности с гидромеханической и электрической передачей и произвести подробные эксплоатационные испытания их. Такой метод выбора передачи с разработкой и исследованием различных видов ее был принят Советской Россией, когда промышленность и железнодорожный транспорт находились в весьма тяжелом положении. Отказываться от него теперь, когда промышленность Советского Союза неизмеримо выросла, конечно, нецелесообразно.

Дизельпоезда с механической передачей на наших дорогах эксплоатируются. В ближайшее время поступают в эксплоатацию дизельпоезда с электрической передачей. Их эксплоатация поможет выяснить вопрос о типе электрической передачи для этого вида дизельной тяги.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Литература

1. Е. Я. Гаккель. Тепловозы с электрической передачей. Электричество, № 2, 1950.
2. А. Н. Шелест. Исследование работы тепловоза бр. Зульцер в Швейцарии. Вестник инженеров, № 3, 1917.
3. В. И. Гриневецкий. Проблема тепловоза и ее значение для России. Изд. Теплотехнического института, 1923.
4. Бюллетень Тепловозной комиссии НКПС, вып. № 1—3, Транспечать, 1927—1930.
5. Я. М. Гаккель. Тепловоз системы Я. М. Гаккель. Предприятие, № 5 (10), 1924.
6. Н. А. Болдов. Диссертация 1938 (МЭИ им. Молотова).
7. А. Д. Степанов. Тепловозы с электрической передачей. Справочник „Машиностроение", т. 13. Машгиз 1949.
8. А. А. Пойдо и К. И. Рудая. Тепловозы. Трансжелдориздат, 1949.
9. M. J. Baldwin. Railway Mechanical Engineer, March, 1949.
10. R. Lamborn. AIEE Transactions, vol. 67, 1948.

[27. 4. 1950]

Измерения максимальной разности потенциалов в рельсовых цепях электрического транспорта

Кандидат техн. наук Д. Б. ЛОМАЗОВ

Днепропетровский институт железнодорожного транспорта им. Кагановича

Приводятся результаты аналитического и экспериментального исследования распределения токов и потенциалов в рельсовых цепях. Определены значения коэффициентов утечки и переходных сопротивлений рельсовых цепей и выявлено влияние на эти параметры развития станционных путей. Разработан метод оценки качества эксплоатируемых рельсовых цепей. Разработана и внедрена схема для измерения максимальной разности потенциалов в рельсовых цепях электрических железных дорог и трамваев.

Из года в год увеличивается число уложенных в земле кабелей высокого напряжения и связи, водопроводных, теплопроводных, газопроводных труб и других металлических сооружений. Ответвляющиеся от рельсовых цепей электрических железных дорог и трамваев блуждающие токи проникают в металлическую оболочку таких подземных сооружений и в местах выхода, вблизи отсасывающих пунктов, образуют анодную коррозийную зону. Интенсивность разрушения металлических оболочек зависит от многих причин: нагрузки и состояния рельсовых цепей, конструкции подземных сооружений, методов защиты соседних подземных сооружений, полярности рельс и т. п. Эти разрушения наносят значительный вред народному хозяйству. Однако защите металлических сооружений от блуждающих токов уделяется еще недостаточное внимание.

Для обеспечения нормальной эксплоатации рельсовых цепей и подземных сооружений введены «Правила защиты подземных сооружений от коррозии блуждающими токами», обязательные для всех ведомств. § 5 этих Правил указывает, что напряжение между двумя любыми точками рельсовой сети в черте города, вычисленное по средней суточной нагрузке пути, не должно превышать 2,5 *в*. Также требуется (§ 38), чтобы при составлении проекта электрической железной дороги или при электрификации существующей линии железной дороги, вычисленная средняя величина падения напряжения между двумя любыми точками пути не оказывалась бы выше 3 *в* на 1 *км*.

Эти параграфы Правил, с одной стороны, подчеркивают важность ограничения разности потенциалов в рельсовых цепях для уменьшения блуждающих токов, а с другой стороны, молча признают отсутствие способов измерения и методов систематического контроля максимальной разности потенциалов в эксплоатируемых рельсовых цепях. Ниже приводится описание метода определения такой разности потенциалов и контроля качества работы рельсовых цепей в условиях эксплоатации.

Распределение потенциалов и токов в рельсовых цепях. На рис. 1 показано распределение токов в рельсовой цепи и земле при одной сосредоточенной нагрузке изолированного с двух сторон участка. К контактному проводу присоединен положительный полюс преобразователя тяговой

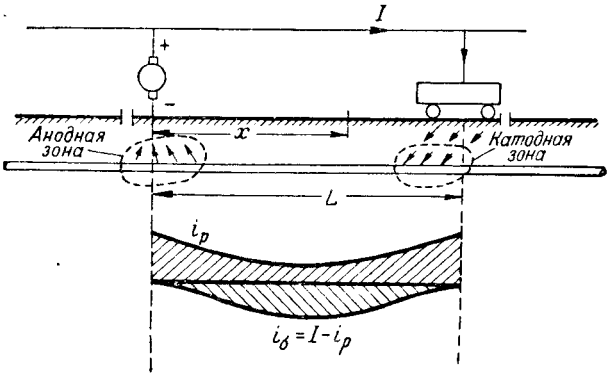

Рис. 1. Токораспределение при одной сосредоточенной нагрузке изолированного с двух сторон участка.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

подстанции, а к рельсам отрицательный. Преимуществом такой полярности рельс является, как известно, то, что анодные зоны, образованные в местах выхода блуждающих токов из подземных сооружений, концентрируются вблизи отсасывающих пунктов. Вследствие этого легче осуществлять защиту подземных сооружений, так как расположение анодных зон известно и ограничено. При отрицательной полярности контактного провода анодные зоны распределяются вдоль районов расположения рельсовых цепей на всем их протяжении, что затрудняет осуществление защитных мероприятий.

Значение тока в рельсовой цепи в сечении x участка, изолированного с двух сторон (рис. 1),

$$i_p = I \frac{\operatorname{ch} a\left(\frac{L}{2} - x\right)}{\operatorname{ch} \frac{aL}{2}}. \qquad (1)$$

Блуждающий ток в земле в сечении x

$$i_б = I\left[1 - \frac{\operatorname{ch} a\left(\frac{L}{2} - x\right)}{\operatorname{ch} \frac{aL}{2}}\right]; \qquad (2)$$

здесь $a = \sqrt{\frac{r_p}{r_п}}$ — характеристика утечки;

r_p — продольное сопротивление рельс, *ом/км*;

$r_п$ — переходное сопротивление рельс, *ом. км*.

Выясним, как распределяются вдоль участка потенциалы рельс относительно земли. Для этого важно определить зону, в которой потенциалы рельс и земли одинаковы. Для этой зоны характерны следующие условия: а) зона находится в пределах исследуемого перегона; б) в этой зоне токи не ответвляются из рельс в землю и не возвращаются из земли в рельсы. Из этих условий следует что в этой зоне токи в рельсах минимальны, а поток блуждающих токов максимален. Местоположение зоны легко определяется по условию минимума выражения (1). Эта зона находится в середине перегона: $x = \frac{L}{2}$.

Для определения потенциалов в рельсовой цепи воспользуемся уравнением

$$dU_p = i_p r_p dx. \qquad (3)$$

Из (2) и (3) получаем, что потенциал рельс относительно середины участка

$$U_p = \pm \frac{I r_p}{\operatorname{ch} \frac{aL}{2}} \int_{\frac{L}{2}}^{x} \operatorname{ch} a\left(\frac{L}{2} - x\right) dx =$$

$$= \pm \frac{I r_p \operatorname{sh} a\left(\frac{L}{2} - x\right)}{a \operatorname{ch} \frac{aL}{2}}. \qquad (4)$$

На рис. 2 сопоставлены кривые распределения потенциалов в рельсе по выражению (4) и для

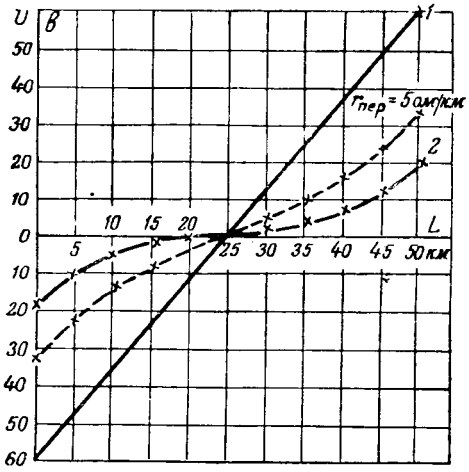

Рис. 2. Распределение потенциалов в рельсе.

1 — в предположении, что рельс изолирован; *2* — с учетом проводимости земли по выражению

$$U_p = \frac{I r_p}{a} \frac{\operatorname{sh} a\left(\frac{L}{2} - x\right)}{\operatorname{ch} a \frac{L}{2}}.$$

рельс, изолированных от земли. Разгрузка рельс блуждающими токами приводит к значительному уменьшению падения напряжения.

При равномерно распределенной нагрузке, когда

$$i_p = I \frac{x}{L} - i_б,$$

$$i_p = I \frac{\operatorname{sh} a(L - x)}{\operatorname{sh} aL}, \qquad (5)$$

$$i_б = I\left[1 - \frac{x}{L} - \frac{\operatorname{sh} a(L - x)}{\operatorname{sh} aL}\right]; \qquad (6)$$

здесь I — ток в питательной линии.

Для выяснения зависимости $U_p = f(x)$ при равномерно распределенной нагрузке определим зону, в которой потенциалы рельс и земли одинаковы. Условием, определяющим эту зону, является, как и ранее, максимум потока блуждающих токов в этой зоне.

Из (6) находим зону с максимальным значением $i_б$:

$$x_м = L - \frac{1}{a} \operatorname{Ar\,ch} \frac{\operatorname{sh} aL}{aL} =$$

$$= L - \frac{1}{a} \ln\left[\frac{\operatorname{sh} aL}{aL} + \sqrt{\left(\frac{\operatorname{sh} aL}{aL}\right)^2 - 1}.\right] \qquad (7)$$

Значения $\frac{x_м}{L}$ для магистральных железных дорог приведены в табл. 1.

Таблица 1

L, *км*	2	5	10	15	20	25	30	35	40
$\frac{X_м}{L}$, %	42	41,6	38,8	35,5	32,2	29,28	26,9	24,8	23,2

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

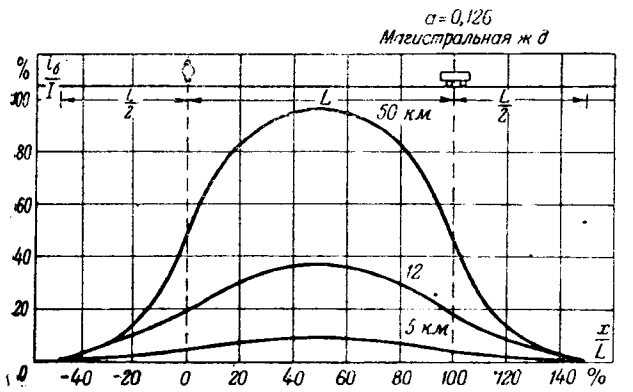

Рис. 3. Распределение блуждающих токов в магистральной железной дороге с учетом влияния смежных участков.

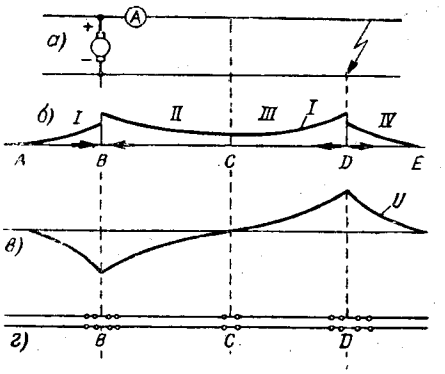

Рис. 4.

а — схема; *б* — токораспределение; *в* — распределение потенциалов; *г* — распределение наблюдательных пунктов.

Зона нулевого потенциала рельсовой цепи при равномерно распределенной нагрузке передвигается (табл. 1) в сторону отсасывающего пункта тем больше, чем больше длина участка. Это указывает на то, что в реальных условиях перемещающихся нагрузок анодные зоны подземных сооружений концентрируются у пунктов отсасывания и занимают гораздо меньшую площадь, чем в случае (рис. 1) консольного питания неподвижной нагрузки.

Подставив значение ip из (5) в (3), получим общее выражение для определения потенциалов рельсовой цепи при равномерно распределенной нагрузке:

$$U_p = \frac{Ir_p}{\operatorname{sh} aL} \int_0^x \operatorname{sh} a(L-x)\,dx =$$

$$= \frac{Ir_p}{a \operatorname{sh} aL} [\operatorname{ch} aL - \operatorname{ch} a(L-x)]. \qquad (8)$$

Если распространить полученные выражения на рельсовую цепь, протянутую без ограничений в обе стороны, получим картину токораспределения и распределения потенциалов, приведенную на рис. 3 и 4. При одинаковых условиях движения и параметрах рельсовой цепи токи смежных участков компенсируются и расчеты токораспределения в неограниченной рельсовой цепи можно производить по формулам для отдельных участков.

Рельсовый ток центрального участка имеет минимум в середине участка и два максимума в сечениях $x = 0$ и $x = L$.

Основные параметры рельсовых цепей. Из приведенных формул и кривых видно, что коэффициент утечки $a = \sqrt{\frac{r_p}{r_n}}$ является основным параметром, определяющим характер распределения токов и потенциалов в рельсовых цепях.

Вопросам токораспределения в рельсовых цепях посвящено большое количество статей на русском и иностранных языках, однако пока еще неизвестны простые методы определения и измерения коэффициента утечки. Опубликованные значения r_p и r_n показывают значительные расхождения. Нами были произведены измерения этих величин в реальных условиях эксплоатации.

При определении продольного сопротивления рельс необходимо учитывать износ рельс и сопротивление стыков. Наибольшие затруднения вызвало определение сопротивлений стыков. 1 646 стыков, измеренных в эксплоатационных условиях на электрифицированном участке Сталинской железной дороги, увеличили продольное сопротивление рельс на 57%. Учет всех дополнительных факторов определил продольное сопротивление одноколейного пути $r_p = 0{,}03$ *ом/км*.

Большие затруднения были связаны с определением переходного сопротивления r_n. Анализ опубликованных материалов и способов измерения r_n вынуждает сделать вывод, что, повидимому, сейчас еще нет надежного способа определения r_n.

Неоднократные опыты на электрифицированном участке Сталинской железной дороги показали, что для определения характеристики утечки a нет необходимости в раздельном определении r_p и r_n.

Пользуясь опытом, который автор рекомендует назвать «опыт короткого замыкания», имеется возможность уверенно определить характеристику утечки a. Для осуществления этого опыта один из выпрямительных агрегатов тяговой подстанции включается на пониженное напряжение. Первичная обмотка трансформатора в нашем случае включалась на напряжение 6 *кв* вместо 35 *кв*. Выпрямленное напряжение составило около 300 *в* вместо 3,5 *кв*.

Контактный провод испытуемого участка с пониженным напряжением на расстоянии L от тяговой подстанции надежно соединяется с рельсом. Схема соединений, токораспределение и распределение напряжений приведены на рис. 4. Ток разветвляется из точки D рельсовой цепи в обе стороны. Та часть тока, которая направляется на IV участок, есть ток утечки на смежный участок. Ток III и II участков — это сумма сквозного и блуждающего токов, значение которой максимально в точках D и B и минимально в середине участка в точке C.

Примем, что вследствие симметрии на смежные участки ответвляются одинаковые токи, которые поэтому могут быть исключены из рассмот-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

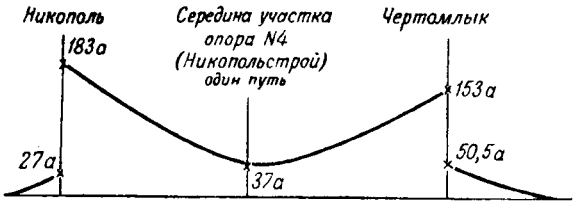

Рис. 5. Результаты опыта короткого замыкания на участке Никополь-Чертомлык (25 марта 1949 г.).

рения Тогда токораспределение на участках *II* и *III* можно приравнять к токораспределению участка, изолированного с двух сторон по рис. 1.

В точках *B, C* и *D* устанавливаются бригады, которые в наблюдательных пунктах *B* и *D* определяют максимальное значение тока *I* участка, а в середине участка, в точке *C*, определяют минимальное значение тока i_p участка. По сотношению токов в точках *D* и *C* легко определяется характеристика утечки *a*. Такой опыт короткого замыкания был произведен на участке Никополь—Чертомлык ($L = 19{,}486$ *км*). Максимальный ток в Никополе составил 183,7 *а*, в Чертомлыке 153 *а*, минимальный ток в середине участка 37 *а*.

Как видно из рис. 5, токи смежных участков неодинаковы. В Чертомлыке ток смежного участка составляет 50,5 *а*, в Никополе 27 *а*. Это объясняется тем, что на ст. Чертомлык, в сторону ст. Подстепное, имеется развитие путей. На станции же Никополь измерение производилось в конце станции, недалеко от горловины, где нет развития путей на смежный участок.

Соотношение максимального тока в Чертомлыке к току в середине участка

$$\frac{153}{37} = \operatorname{ch}\frac{aL}{2} = 4{,}15 = \operatorname{ch} a\, 9{,}743,$$

откуда $a = 0{,}215\,\frac{1}{км}$. Соотношение максимального тока в Никополе к току в середине участка $\frac{183{,}7}{37} = \operatorname{ch}\frac{aL}{2} = 4{,}95 = \operatorname{ch} a \cdot 9{,}743$, откуда $a = 0{,}234\,\frac{1}{км}$. Средняя характеристика утечки этого участка $a = \frac{0{,}234 + 0{,}215}{2} = 0{,}225\,\frac{1}{км}$.

Теперь

$$r_п = \frac{r_p}{a^2} = \frac{0{,}03}{0{,}225^2} = 0{,}59 \text{ ом.км.}$$

Опыт производился при влажной почве в солнечную погоду и температуре воздуха $+15°$ С. Балласт — щебеночный. Влияние развития путей на токораспределение было выявлено при помощи опыта короткого замыкания, произведенного на участке Никополь — Марганец 25 августа 1949 г. (ниже, рис. 6).

Замыкание контактного провода на рельс было произведено у горловины станции Марганец в направление Запорожья. Ток от места закоротки разветвлялся: в направление станции Запорожье 20,6 *а*; в сторону развитых путей станции

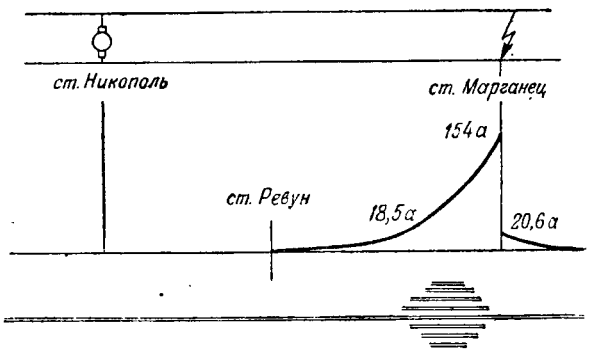

Рис. 6. Результаты опыта короткого замыкания на участке Никополь—Марганец (25 августа 1949).

Марганец 154,4 *а*; в горловине той же станции Марганец ток в направление станции Никополь составил только 18,5 *а*.

Опыт выявил большое влияние развитых путей станции. Из общего тока 175 *а* ток смежного участка составил 11,8%, ток в рельсовой цепи за станцией Марганец в направление питающей тяговой подстанции Никополь 10,6%, а 77,6% общего тока опыта через развитие пути станции Марганец растекались в земле, минуя основные рельсовые пути участка Марганец — Никополь.

Значения *a* и $r_п$, определенные из опытов короткого замыкания на электрифицированном участке Сталинской железной дороги в 1949 г., приведены в табл. 2.

Таблица 2

Участок	Длина, *км*	Состояние погоды и почвы	Дата опыта	a, $\frac{1}{км}$	$r_п$ *ом·км*
Никополь—Чертомлык	19,5	Солнечная, балласт сухой, почва влажная	Март 1949	0,225	0,59
Никополь—Никопольстрой	8,45	Солнечная, балласт сухой, почва влажная	Март 1949	0,211	0,67
Марганец—Никополь, Марганец—Ревун	18	Сухая, солнечная, почва и балласт сухие	Август 1949	0,276	0,39
Марганец—Никополь, Марганец—Ревун, развитые пути станции Марганец	20	Солнечная, сухая, почва и балласт сухие	Август 1949	0,46	0,14

Полученные результаты позволяют несколько ограничить опубликованные широкие пределы значений $r_п$. Можно также сделать тот предварительный вывод, что степень влажности почвы при щебеночном балласте мало влияет на значение $r_п$.

Измерение максимальной разности потенциалов в рельсовой цепи. Распределение потенциалов относительно земли в рельсовой цепи с постоянными параметрами при одностороннем питании приведено на рис. 7.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

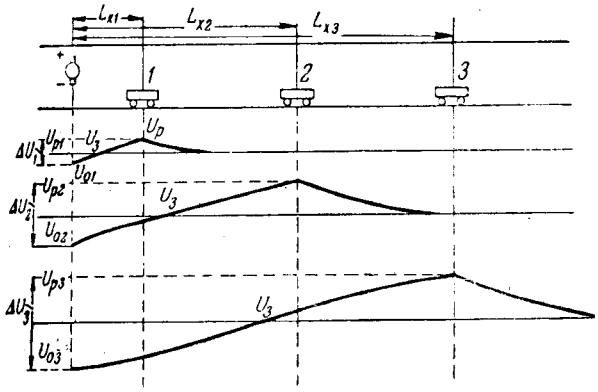

Рис. 7. Распределение потенциалов в рельсовой цепи и потенциалы отсасывающего пункта при различных положениях нагрузки.

Потенциал точки x рельса относительно земли при нахождении на участке одной нагрузки [Л. 4]

$$U_p = \pm \frac{I r_p \operatorname{sh} a\left(\frac{L}{2} - x\right)}{a \operatorname{ch} \frac{aL}{2}}.$$

Как видно из кривых рис. 1 и 7, в середине плеча ($x = \frac{L}{2}$) потенциал рельса при любом положении нагрузки равен потенциалу земли. В точке $x = 0$ обычно располагается пункт отсасывания, потенциал которого относительно земли

$$U_0 = -I \frac{r_p}{a} \operatorname{th} \frac{aL}{2}. \qquad (9)$$

При одинаковых на всем участке параметрах рельсовой цепи числовое значение потенциала рельса в месте приложения нагрузки равно потенциалу отсасывающего пункта. Максимальная же разность потенциалов в рельсовой цепи представляет собой разность потенциалов этих точек:

$$\Delta U_м = \frac{2 I r_p}{a} \operatorname{th} \frac{aL}{2} = 2U_0.$$

При одинаковых на всем участке параметрах максимальная разность потенциалов в наиболее удаленных точках рельсовой цепи равна удвоенному потенциалу точки отсасывания относительно удаленной земли.

По мере удаления нагрузки от питающей подстанции (рис. 8) растет ΔU. Непосредственное измерение разности потенциалов в рельсовой цепи между точкой приложения подвижной нагрузки и точкой отсасывания очень трудно осуществить, но эту разность можно найти косвенно, используя свойство отсасывающего пункта отображать потенциал рельсовой цепи в точке приложения нагрузки при любом ее расположении.

Аналитическое определение разности потенциалов. Определим среднее значение максимальной разности потенциалов в рельсовой цепи при перемещении нагрузок I с равномерной скоростью v и консольном питании. Длительность пребывания (часы) постоянной нагрузки I на участке L, $T = \frac{L}{v}$. Потенциал точки отсасывания

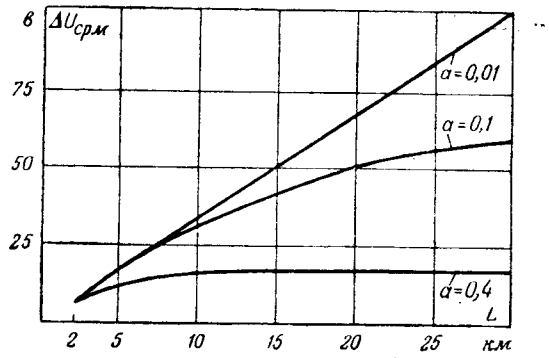

Рис. 8. Значение максимальной разности потенциалов в рельсовых цепях при движении поезда на однопутном участке.

при нахождении поезда в точке $x = vt$

$$U_0 = -I \frac{r_p}{a} \operatorname{th} \frac{avt}{2}.$$

Средний потенциал точки отсасывания при перемещении поезда от $x = 0$ до $x = L$ за время $T = \frac{L}{v}$: $\left(t = \frac{x}{v}\right)$:

$$U_{ср} = \frac{2 I r_p}{a^2 v T} \int_0^T \operatorname{th} \frac{avt}{2} d\left(\frac{avt}{2}\right) = \frac{2 I r_p}{a^2 v T} \ln \operatorname{ch} \frac{aL}{2}.$$

Среднемаксимальная разность потенциалов за время перемещения поезда на участке

$$\Delta U_{ср\,м} = \frac{4 I r_p}{a^2 L} \ln \operatorname{ch} \frac{aL}{2}. \qquad (10)$$

Кривые значений среднемаксимальной разности потенциалов в рельсовой цепи при консольном питании и постоянной нагрузке ($I = 200$ *а*) приведены на рис. 8. При очень хорошем состоянии балласта и очень малых значениях характеристики утечки (0,01) $\Delta U_{ср\,м}$ увеличивается пропорционально длине перегона (рис. 8). При низких же $r_{пср}$ и больших a значения $\Delta U_{ср\,м}$, начиная с $L = 10-15$ *км*, устанавливаются и не зависят в дальнейшем от увеличения L. Это объясняется тем, что с увеличением длины участка все большее влияние оказывает разгрузка рельс блуждающими токами. При $a = 0{,}25$ (условия Сталинской железной дороги) с увеличением длины рельсовой цепи более 15 *км* ее сопротивление не увеличивается (рис. 8).

Из рис. 8 также видно, что потенциал рельсовой цепи относительно земли может достигать значительных величин, опасных в эксплоатации. Известен случай, когда при разгрузке шлангами с металлической оболочкой горючих материалов из железнодорожных цистерн в результате соединения такой оболочки с металлическим заземленным баком образовалась искра, дуга и, как следствие, взрыв и пожар.

Принятое нами предположение о симметричном распределении потенциалов между точками

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

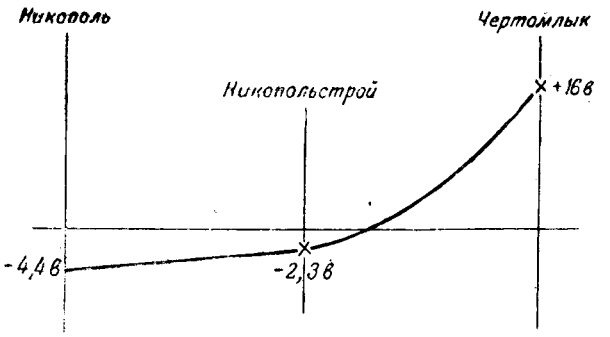

Рис. 9. Распределение потенциалов в рельсовой цепи участка Никополь-Чертомлык относительно удаленноой земли при токе 200 *а*.

приложения нагрузки и отсасывания имеет место не всегда. В большинстве случаев отсасывающие пункты электрических железных дорог располагаются в зоне развитых путей железнодорожных станций, соединенных между собой. Вследствие этого переходное сопротивление путей в точке отсасывания меньше, чем в точке приложения нагрузки, находящейся на перегоне одиночного или двойного пути. В связи с этим выражение (10) должно быть дополнено коэффициентом, учитывающим различное значение переходных сопротивлений.

Для определения таких коэффициентов на электрифицированном участке Сталинской железной дороги были произведены специальные опыты. На участке Никополь — Чертомлык длиной 19,5 *км* был произведен опыт короткого замыкания с током в контактном проводе 200 *а*. В Чертомлыке контактный провод был присоединен к рельсу. Питание опытного участка осуществлялось от тяговой подстанции Никополь.

Потенциалы рельс относительно удаленной земли измерялись в Чертомлыке, в середине опытного участка - - Никопольстрое и на станции Никополь.

Результаты этих измерений показаны на рис. 9.

Потенциал тщательно соединенных между собой рельс развитых путей станции Никополь в четыре раза меньше, чем в Чертомлыке. Подобные результаты были получены также на участках Никополь — Никопольстрой и Никополь — — Марганец.

Коэффициент несимметрии в данном случае

$$k_н = \frac{U' + U''}{U'} \approx 5.$$

В общем случае разность потенциалов, измеренная в точке отсасывания,

$$\Delta U_{срм} = U_0 k_н = \frac{4 I r_1 k}{a^2 L} \ln \operatorname{ch} \frac{aL}{2}. \qquad (10а)$$

Экспериментальные методы определения максимальной разности потенциалов. Потенциал точки отсасывания относительно удаленной земли может быть измерен непосредственно на тяговой подстанции, в месте

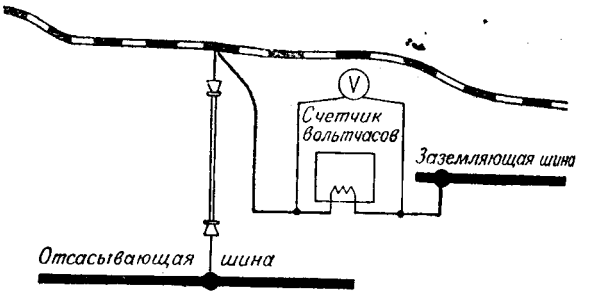

Рис. 10. Схема измерения потенциала в рельсовой цепи.

присоединения отсасывающего кабеля. Для определения потенциалов отсасывающего пункта могут быть предложены различные схемы, основанные на измерениях разности потенциалов между отсасывающей шиной и заземляющим устройством тяговой подстанции.

На тяговой подстанции Никополь испытывалась схема (авторское свидетельство № 396092 - III) рис. 10. Счетчик вольтчасов включался между точкой присоединения отсасывающего кабеля к рельсовой цепи и заземляющей магистралью. Такой счетчик вольтчасов или вольтметр для периодических измерений, установленный в помещении тяговой подстанции, позволяет определить потенциал отсасывающего пункта за контрольный период. Осуществление такой схемы не представляет затруднений и не вызывает каких-либо усложнений в эксплоатации.

На тяговой подстанции Никополь по измерениям за сутки (16 августа 1949 г.) был при помощи счетчика вольтчасов определен средний потенциал точки отсасывания относительно земли $U_0 = 2{,}13$ *в*. Среднесуточная максимальная разность потенциалов в рельсовой цепи $U_{срм} = U_0 k_н = 2{,}13 \cdot 5 = 10{,}65$ *в*. Если принять длину участка до точки токораздела равной 13 *км*, получаем, что средняя величина падения напряжения на 1 *км* $U_{ср} = \frac{10{,}65}{13} = 0{,}82$ *в/км*, что значительно меньше допускаемых 3 *в/км*. Рельсовые цепи на участке Никополь — Чертомлык и Никополь—Марганец по этим показателям удовлетворяют требованиям. Пробная эксплоатация таких схем и на трамвайной подстанции показала надежную работу всего устройства.

Такой метод позволяет осуществлять контроль за качеством рельсовых цепей, может быть внедрен в короткие сроки и будет содействовать выявлению плохих рельсовых цепей.

Значительную помощь в выполнении работы оказало содружество, установившееся между коллективами научных работников Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта им. Кагановича и Сталинской железной дороги. В работе принимали участие кандидат техн. наук С. М. Сердинов, инженеры Сталинской железной дороги И. Я. Ивченко, К. Г. Кучма, А. И. Карпенко, В. И. Николаев, И. А. Гаращенко и др.

Литература

1. А. Б. Лебедев. Основы электрической тяги. ОНТИ, 1937.
2. Д. Б. Ломазов. Распределение токов и потенциалов в рельсовых цепях электрических железных дорог и трамваев. Доклады XI НТК-ДИИТ, 1948.
3. К. Г. Марквардт. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Трансжелдориздат, 1949.
4. В. Е. Розенфельд. Электрическая тяга поездов. Трансжелдориздат, 1940.
5. Ю. Е. Рывкин. Об измерении переходных сопротивлений. Электричество, № 8, 1931.

[28. 2. 1950]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Несимметричное включение двух механически связанных асинхронных двигателей

Е. А. ЛЕЙБОВИЧ

Москва

Широкое распространение в народном хозяйстве асинхронных двигателей и внедрение их в область промышленного привода заставляют искать способы улучшения регулировочных механических характеристик и возможного приближения их к гибким характеристикам двигателей постоянного тока. В настоящей работе решается частная задача получения промежуточной регулировочно-тормозной характеристики при использовании, для достижения основной тормозной характеристики, схемы однофазного включения двух спаренных двигателей.

Каждый из двух асинхронных двигателей, работающих на общий механический вал, может быть включен однофазно так, как это показано на рис. 1. Контакты *1к* и *2к* замкнуты. При подобном однофазном включении каждого двигателя все три фазы сети оказываются под нагрузкой. Механические характеристики двигателей соответствуют кривой *1Т* на рис. 2.

Для получения наибольшего тормозного момента при синхронной скорости, равного, как известно, одной трети опрокидывающего момента, необходимо сопротивление в роторе выбрать так, чтобы при нормальном симметричном включении статорных обмоток опрокидывающий момент соответствовал бы скольжению, равному 2 (кривая *1С* на рис. 2).

Не меняя сопротивления в роторе, можно получить третью механическую характеристику *2Т*, обеспечивающую уменьшенную скорость холостого хода, тормозной момент при синхронной скорости и двигательный момент при скорости, равной нулю.

Характеристика *2Т* получается при схеме соединения обмоток обоих двигателей, отличающейся от схемы однофазного включения по рис. 1 только размыканием одного контакта *2к* [Л. 1]. При одинаковом порядке следования фаз к сети присоединяются только две фазы статора каждого двигателя, а третьи фазы соединяются между собой.

На рис. 3 представлены топографические диаграммы векторов напряжений при неподвижных двигателях.

Как показано в приложении, независимо от нагрузок на валу двигателей напряжение между

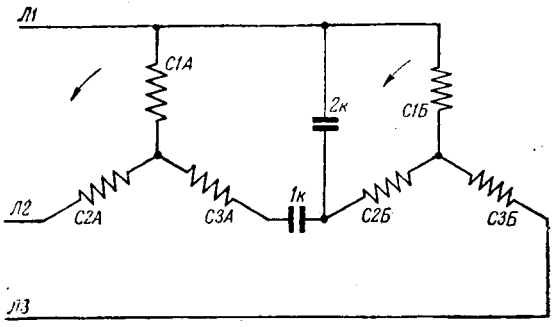

Рис. 1.

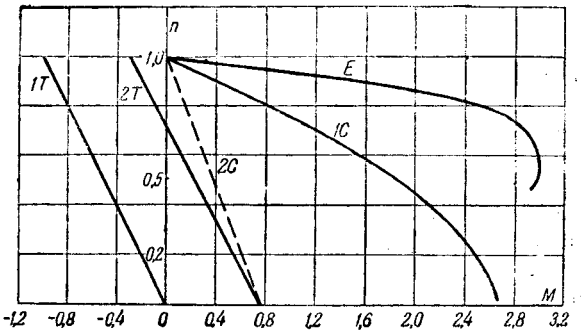

Рис. 2.

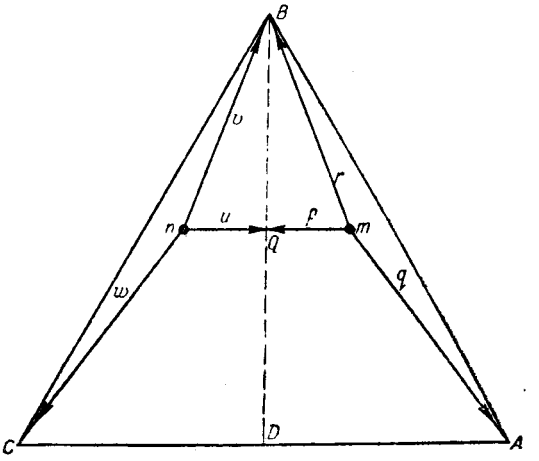

Рис. 3.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

нулевыми точками двух статорных обмоток, соединенных в звезду, всегда равно одной трети линейного напряжения. При скорости, равной нулю, фазные напряжения третьих фаз равны между собой и составляют $^1/_6$ линейного напряжения.

Моменты, развиваемые на валу двигателей, могут быть подсчитаны путем суммирования моментов прямой и обратной последовательности каждого двигателя, определяемых по формуле:

$$M = \frac{6(1 + rs_м)}{\frac{s_м}{s} + \frac{s}{s_м} + 2s_м r} |U_n|^2, \qquad (1)$$

где M — величина момента в долях от максимального момента двигателя при нормальном симметричном включении;

r — отношение сопротивления статора к приведенному сопротивлению роторной цепи;

s — скольжение прямой или обратной последовательности;

$s_м$ — скольжение, соответствующее максимальному моменту при нормальном двигательном режиме и заданном внешнем сопротивлении;

$|U_n|$ — абсолютная величина фазного напряжения прямой или обратной последовательности, выраженная в долях от линейного напряжения.

Величина момента при скольжении, равном 1, может быть получена непосредственно из сравнения площадей AQB и CQB, определяемых векторами фазных напряжений, с площадью ACB, соответствующей нормальному симметричному включению. Так как отношение этих площадей равно $^1/_4$ [что вытекает из уравнения (22)], то и результирующий начальный момент составит $^1/_4$ от момента при симметричном включении и неподвижном двигателе. Последний вывод может быть сделан на основании известной теоремы о том, что площадь треугольника, построенного по значениям трех векторов, образующих замкнутый треугольник, равна разности площадей равносторонних треугольников со сторонами, равными их симметричным составляющим прямой и обратной последовательности [Л. 2].

Приложение. В силу симметрии фаз двигателей, соединенных в звезду, нулевые составляющие токов и фазных напряжений будут отсутствовать. Обозначим стороны треугольника линейных напряжений на топографической диаграмме (рис. 4) через $1, a, a^2$, а звезды искомых фазных напряжений двигателей через u, v, w и p, q, r. Векторы фазных напряжений левой системы можно выразить через вектор u, а векторы правой системы через p.

Действительно, из рис. 4 можем получить:

$$w = v + a^2 = -u - v, \qquad (2)$$

откуда

$$v = \frac{-u - a^2}{2}, \qquad (3)$$

$$w = \frac{-u + a^2}{2}, \qquad (4)$$

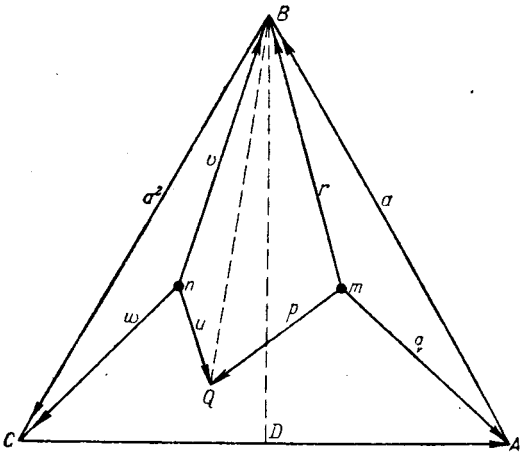

Рис. 4.

аналогично, для правой системы

$$r = q + a = -p - q, \qquad (5)$$

откуда

$$q = \frac{-p - a}{2}, \qquad (6)$$

$$r = \frac{-p + a}{2}. \qquad (7)$$

Первое из уравнений, необходимых для определения неизвестных u и p, определяется обходом по замкнутому контуру $v\,r\,p\,u$.

$$v - r + p - u = 0. \qquad (8)$$

Учитывая, что $a^2 + a + 1 = 0$ и принимая во внимание уравнения (3) и (7), находим после преобразований:

$$u - p = \frac{1}{3}. \qquad (9)$$

Это уравнение показывает, что напряжение между нулевыми точками статорных звезд остается неизменным по величине и направлению.

Второе уравнение, связывающее величины u и p, можно написать, исходя из равенства токов в соединенных между собой фазах обеих машин:

$$\frac{u_{пр}}{Z_{пр}} + \frac{u_{обр}}{Z_{обр}} + \frac{p_{пр}}{Z_{пр}} + \frac{p_{обр}}{Z_{обр}} = 0; \qquad (10)$$

здесь $u_{пр}$ — составляющая прямой последовательности, определяющая напряжение u;

$u_{обр}$ — составляющая обратной последовательности для u;

$p_{пр}, p_{обр}$ — составляющие прямой и обратной последовательностей, определяющие напряжение p;

$Z_{пр}, Z_{обр}$ — полные сопротивления прямой и обратной последовательностей двигателей, если принять, что обе машины идентичны.

Полагая $\frac{Z_{пр}}{Z_{обр}} = Z$, получим:

$$u_{пр} + p_{пр} = -Z(u_{обр} + p_{обр}). \qquad (11)$$

На основании принятой на рис. 4 последовательности фаз можем написать:

$$u_{пр} = \frac{u + a^2 v + aw}{3}, \qquad (12)$$

$$p_{пр} = \frac{p + a^2 q + ar}{3}. \qquad (13)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Подставляя в уравнения (12), (13) значения v, w, q и r из уравнений (3), (4), (6) и (7) и принимая во внимание, что

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

находим

$$u_{пр} = \frac{u}{2} + \frac{1}{4} - \frac{j\sqrt{3}}{12}, \quad (14)$$

$$p_{пр} = \frac{p}{2} - \frac{1}{4} - \frac{j\sqrt{3}}{12}. \quad (15)$$

Для составляющих обратной последовательности аналогичным образом можно получить:

$$u_{обр} = \frac{u}{2} - \frac{1}{4} + \frac{j\sqrt{3}}{12}, \quad (16)$$

$$p_{обр} = \frac{p}{2} + \frac{1}{4} + j\frac{\sqrt{3}}{12}. \quad (17)$$

Возвращаясь к уравнению (11), можем на основании последних уравнений написать условие равенства токов в фазах u и p

$$u + p = \frac{j(1-Z)}{\sqrt{3}(1+Z)}. \quad (18)$$

Решая совместно последнее уравнение с уравнением (9), находим:

$$u = \frac{1}{6} + j\frac{(1-Z)}{2\sqrt{3}(1+Z)}. \quad (19)$$

$$p = -\frac{1}{6} + j\frac{(1-Z)}{2\sqrt{3}(1+Z)}. \quad (20)$$

Для построения топографической диаграммы можно предварительно найти напряжение общей точки Q третьих фаз относительно общей точки сети B, как разность фазных напряжений v и u.

$$v - u = \frac{j\sqrt{3}}{2}\left(\frac{Z}{1+Z}\right). \quad (21)$$

Уравнение (21) показывает, что напряжение общей точки обеих машин на топографической диаграмме определяется вектором $\frac{j\sqrt{3}}{2}$, т. е. апофемой треугольника линейных напряжений, опущенной из B, повернутой на некоторый угол и уменьшенной в масштабе

$$\left|\frac{Z}{1+Z}\right|.$$

В частном случае, при неподвижном двигателе, когда $z = 1$, имеем $\frac{Z}{1+Z} = \frac{1}{2}$, т. е. напряжение общей точки равно половине апофемы (как это показано на рис. 3) или составляет $^2/_3$ от номинального фазового напряжения,

$$\overline{BQ} = \frac{1}{2}\overline{BD}. \quad (22)$$

Величины фазных напряжений u и p при неподвижном двигателе будут на основании уравнений (19) и (20);

$$u = \frac{1}{6}, \quad (23)$$

$$p = -\frac{1}{6}. \quad (24)$$

Литература

1. Е. А. Лейбович и М. И. Кустанович. Авторская заявка № 380683-III от 17. V. 1948.
2. К. А. Круг. Теория переменных токов. Госэнергоиздат, М., 1946.

[3. 6. 1949]

◇ ◇ ◇

О некоторых вопросах методики расчета импульсных генераторов напряжения

Кандидат техн. наук А. В. СТУКАЧЕВ
Москва

Изложен метод расчета разрядного режима импульсного генератора, предназначенного для генерирования кратковременных импульсов весьма высокого напряжения. Предложены формулы, позволяющие определить характер изменения во времени напряжения в наивысшей точке импульсного генератора, а также найти величину демпфирующего сопротивления, необходимую для подавления вредных колебаний. Излагается также метод определения паразитных емкостей импульсного генератора, значение численных величин которых необходимо для практического использования выведенных формул. Приведены некоторые примерные расчеты, связанные с проектированием импульсного генератора на напряжение 8,3 млн. в.

Испытания изоляции электрической аппаратуры и трансформаторов импульсами напряжения заданной формы являются нормальным видом испытаний. Генератор импульсов в современных высоковольтных лабораториях как научно-исследовательских институтов, так и соответствующих промышленных предприятий является неотъемлемой частью оборудования.

При работе генератора импульсов возможно появление искажающих паразитных колебаний, делающих результаты исследований различных лабораторий трудно используемыми и несопоставимыми. Амплитуда этих колебаний зависит как от конструктивного выполнения генератора, так и от взаимного расположения его и объекта испытания и обусловливается наличием паразитных емкостей (по отношению к земле и отдельных элементов друг по отношению к другу), которые совместно с неизбежной индуктивностью элементов разрядной цепи генератора образуют колебательные контуры.

Устранение паразитных колебаний осуществляется посредством включения в цепь разряда демпфирующего сопротивления. Определение надлежащей его величины является одной из центральных задач расчета импульсных генера-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

торов. Несмотря на наличие большого количества опубликованных работ, посвященных расчету генератора импульсов, до настоящего времени нет общепринятой инженерной методики расчета элементов разрядной цепи генератора — методики, которая, не приводя к чрезмерно громоздким и сложным формулам, учитывала бы в то же время наиболее существенные черты рассматриваемых процессов.

В статье рассмотрен холостой ход генератора, представленного схемой замещения с распределенными постоянными, и решена задача о выборе величины демпфирующего сопротивления, необходимой для подавления искажающих колебаний, присущих внутренней структуре генератора импульсов, иначе говоря, колебаний, возникающих благодаря наличию паразитных емкостей, определяющихся пространственным расположением элементов конструкции генератора.

Принцип работы генератора импульсов чрезвычайно прост,—группа конденсаторов заряжается параллельно и разряжается последовательно. Переключение конденсаторов с параллельного соединения на последовательное производится автоматически при пробое промежуточных искровых разрядников после того, как конденсаторы зарядятся до потенциала U_0. Напряжение на выходе генератора равно U_0N — произведению потенциала U_0 на число конденсаторов N; η — коэффициент использования, который всегда бывает меньше единицы. Схема замещения импульсного генератора представлена на рис. 1; генератор импульсов эквивалентен короткой линии с распределенными постоянными, к концу которой последовательно с индуктивностью подводящих проводов $L_{пр}$ подключено некоторое полное сопротивление $Z(p)$, определяющееся характером испытуемого объекта (высоковольтный ввод, гирлянда изоляторов, трансформатор и пр.). Точное решение для указанной системы с учетом внутренней структуры полного сопротивления $Z(p)$ остается вне нашего рассмотрения. Интеграл дифференциального уравнения, написанного для схемы, приведенной на рис. 1, будет найден для случая холостого хода при $Z(p)=\infty$. Влиянием зарядных сопротивлений без ущерба для правильности решения можно пренебречь.

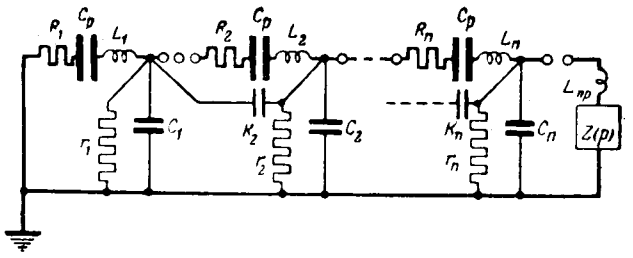

Рис. 1. Полная схема замещения импульсного генератора. C_p — рабочая емкость ступени; L_n — индуктивность ступени; R_n — демпфирующее сопротивление ступени; K_n — емкость между двумя соседними ступенями; C_n — емкость ступени по отношению к земле; r_n — зарядные сопротивления.

Физические процессы, связанные с разрядом генератора, рисуются в следующем виде: зажигающий импульс приходит на трехэлектродный искровой промежуток и приводит его в состояние разряда. Вслед за этим начинается зарядка емкости C_2 через индуктивность L_2. Затем пробивается промежуток, разделяющий вторую и третью ступени, и ей сообщается суммарный потенциал двух первых ступеней, в то время, как, благодаря наличию емкости C_3, там был потенциал, равный нулю. Итак, каждый пробой нового искрового промежутка приводит к колебательной зарядке соответствующей емкости C_n через индуктивность L_n.

Напряжение в наивысшей точке генератора импульсов может быть представлено интегралом дифференциального уравнения четвертого порядка в частных производных, описывающего процесс зажигания (см. приложение):

$$U_{(t)}=U\left[1-e^{-\frac{t}{2T_L}}\sum_{\nu=1}^{\nu=\infty}\frac{\sin\omega_\nu t+2\omega_\nu T_L\cos\omega_\nu t}{\frac{\omega_\nu T_c}{4}\left(1+4\omega_\nu^2T_\nu^2\right)\left(1+\frac{(2\nu-1)^2\pi^2}{4\alpha^2}\right)}\right] \quad (1)$$

где

$$T_L=L/R_\partial \quad (1а)$$

$$T_c=R_\partial C, \quad (1б)$$

$$\alpha=\sqrt{C/K}, \quad (1в)$$

$$\omega_\nu=\sqrt{\frac{1}{L\left(K+\frac{4C}{(2\nu-1)^2\pi^2}\right)}-\frac{R_\partial^2}{4L^2}}. \quad (1г)$$

Как и следовало ожидать, решение привело нас к спектру затухающих во времени гармоник. Четные гармоники отсутствуют, ибо колебания в полуволну, целую волну и т. д. должны были бы иметь в конце узлы, а не пучности, в силу чего под числами ν не следует подразумевать порядковый номер гармонической основного колебания, так как $\nu=1$ соответствует колебанию в $^1/_4$ волны, $\nu=2$ дает третью гармонику основного колебания, т. е. колебание в $^3/_4$ волны, и т. д.

Используя выражение для ω_ν, найдем условия апериодичности разряда генератора, работающего в холостом режиме:

$$R_\nu\geqslant(2\nu-1)\,2\sqrt{\frac{L}{K(2\nu-1)^2+\frac{4C}{\pi^2}}}. \quad (2)$$

Положив в этом уравнении $2\nu-1=1$, найдем выражение для сопротивления R, необходимого

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

для превращения основной гармоники в апериодический импульс:

$$R_1 = 2\sqrt{\frac{L}{K + 4C/\pi^2}}. \qquad (2а)$$

Знаменатель в подкоренном выражении $K+4C/\pi^2$ обозначим $C_э$ и назовем эффективной паразитной емкостью генератора для основной (первой) гармоники. Эта емкость совместно с индуктивностью собственно генератора определяет частоту колебания основной гармоники, четверть периода которой равна минимальной длине фронта волны, которую вообще можно получить при работе исследуемого генератора. Для проведения вычислений с помощью выведенных формул необходимо установить численные значения постоянных, входящих в расчетную схему замещения. Индуктивность L задается геометрической конфигурацией цепи разряда и может быть аналитически определена (пренебрегая сложностью распределения тока в конденсаторах). Такой подсчет дает результаты с требуемой практической точностью.

Сложнее вопрос определения паразитных емкостей, входящих в схему замещения, численные величины которых задаются пространственным расположением элементов конструкции импульсного генератора и не поддаются расчету. Опубликованные в мировой печати работы по расчету разрядного режима импульсных генераторов в большинстве случаев посвящены определению формы импульса уже существующих, построенных генераторов. Не поддающиеся расчету постоянные обычно определяются путем осциллографирования катодным осциллографом формы импульса и последующего анализа полученных осциллограмм [Л. 1 и 2]. Очевидно, при проектировании изложенный метод не может быть использован. Однако это затруднение может быть преодолено, если для определения численных величин паразитных емкостей использовать принцип подобия, гласящий, что емкости двух геометрических подобных систем пропорциональны их линейным размерам. Тогда, используя модель[1] исследуемого генератора, выполненную в соответствующем масштабе, можно экспериментально, путем простых измерений, установить численные величины интересующих нас паразитных емкостей.

Как известно, зависимость между потенциалом какой-либо системы проводников и зарядами, на них находящимися, дается выражением вида

$$q = CU,$$

где коэффициент пропорциональности C называется емкостью, единица которой в абсолютной системе единиц имеет размерность длины — сантиметры; существующие формулы, определяющие емкость системы как функцию ее геометрических размеров, могут быть преобразованы к следующего рода зависимостям:

$$C = n\frac{S}{l}\,[см]$$

и

$$C = n\frac{l}{\ln\frac{a}{b}},$$

где n — коэффициент пропорциональности;
S — площадь;
a, b и l — линейные размеры.

Откуда следует, что при уменьшении всех линейных размеров системы в n раз емкость ее соответственно уменьшается также в n раз.

Для определения емкости C конструкции генератора по отношению к земле следует соединить между собой электрически все ступени и, изолировав полученную систему от земли, замерить ее емкость по отношению к земле.

Для определения величины K — суммарной емкости ступеней генератора друг по отношению к другу, следует нарушить все электрические соединения ступеней и замерить емкость полученной таким образом системы по отношению к земле. Измерение даст величину входной емкости $C_в$, эквивалентной емкостной цепочке, представляющей комбинацию всех паразитных емкостей, присущих генератору. Входная емкость является важным физическим параметром и, будучи по величине соизмерима с емкостью большинства объектов испытаний, оказывает большое влияние на величину коэффициента использования генератора.

Зная $C_в$ и C, легко определяем, используя емкостную цепочку схемы замещения, величину K:

$$K = C/a^2 = C_в/C,$$

где a определяется формулой (1в).

Измерения, проделанные с помощью специального мостика для измерений малых емкостей на выполненной в масштабе 1 : 20 модели[2] проектируемого генератора на напряжение 8,3 млн. *в*, дали следующие результаты: C — суммарная емкость системы по отношению к земле оказалась равной

$$nC_м = 20 \cdot 61 = 1\,220 \ мкмкф,$$

где n — масштаб модели;
$C_в$ — входная емкость, равная $n \cdot C_{вп} = 20 \cdot 16 = 320$ *мкмкф*.

Зная C и $C_в$, определяем, используя соответствующие формулы, величины: $K = 84$ *мкмкф* и $a = 3{,}78$. Подставляя численные значения емкостей K и C, найдем величину $C_{эп} = 570$ *мкмкф*. Паразитные емкости существующего трехмил-

[1] О вероятной возможности использования для этой цели модели импульсного генератора было указано автору старшим научным сотрудником ВЭИ Г. А. Лебедевым.

[2] Все несущие конструкции и рабочие емкости генератора были выполнены из дерева, оклеены алюминиевой фольгой и затем смонтированы на соответствующих изоляционных конструкциях.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

лионного контура ВЭИ, равны: $C = 1\,140$ *мкмкф* и $C_в = 350$ *мкмкф*. Поверочные измерения, проделанные с помощью модели этого генератора, выполненной в масштабе 1 : 20, дали следующие значения паразитных емкостей: $C = 1\,100$ *мкмкф* и $C_в = 340$ *мкмкф*.

Причиной того, что при измерениях на моделях значения емкостей получаются несколько меньше действительных, является, повидимому, влияние окружающих стен здания, так как емкость модели определялась нами относительно земли при значительном удалении от стен, в то время как в реальных условиях окружающие генератор стены расположены значительно ближе, что приводит к соответствующему увеличению емкостей. Если при измерениях заключать модель в макет здания, то результаты получатся, вероятно, еще ближе к действительности.

При проведении измерений необходимо иметь в виду, что мостик измеряет суммарную емкость исследуемого объекта и подводящих проводов. Поэтому прежде чем умножать результаты измерений на масштаб модели, следует вычитать отдельно замеренную в каждом случае величину емкости подводящих проводов.

Наиболее наглядны физические процессы при работе в холостом режиме, при отсутствии демпфирующего сопротивления. Уравнение (1) тогда существенно упрощается и преобразуется к следующему виду:

$$U_{(t)} = U\left[1 - \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} \frac{8\cos\omega_\nu t}{(2\nu-1)^2\pi^2}\right], \qquad (3)$$

из которого ясно, что амплитуды гармоник при $R_д = 0$ могут быть определены с помощью выражения

$$A_\nu = \frac{8}{(2\nu-1)^2\pi^2}. \qquad (4)$$

Значения A_ν, подсчитанные по указанной формуле, приведены в табл. 1.

Таблица 1

$2\nu - 1$	A_ν
1	0,81
3	0,09
5	0,032
7	0,0165

Для случая отсутствия демпфирующего сопротивления ($R_д = 0$) подсчитаны частоты и соответствующие периоды колебаний гармоник составляющих в сумме интересующий нас импульс напряжения[3]. Результаты подсчетов сведены в табл. 2.

[3] Индуктивность импульсного генератора принята при подсчетах равной 35 *мк.н.*

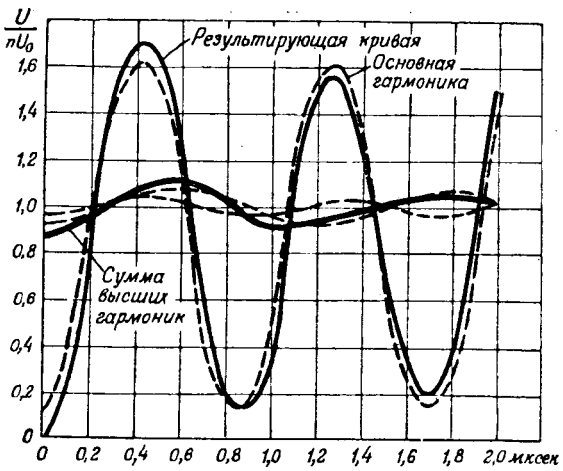

Рис. 2. Форма волны импульсного генератора при отсутствии демпфирующих сопротивлений.

Таблица 2

$2\nu - 1$	ω, *рад/мксек*	f, *пер/мксек*	T, *мксек*
1	7,4	1,2	0,84
3	10,4	1,7	0,6
5	13,8	2,2	0,45
∞	18,5	2,95	0,34

Следует отметить тот факт, что при стремлении числа ν к бесконечности соответствующие частоты, благодаря наличию емкостей K между ступенями генератора, стремятся к предельной величине:

$$\lim_{\nu\to\infty} \omega_\nu = \omega_к = 1/\sqrt{LK}.$$

На рис. 2 представлена рассчитанная по уравнению (1) форма импульса напряжения на выходе генератора, работающего в холостом режиме при отсутствии демпфирующих сопротивлений. При проведении расчета нами учитывалось влияние лишь первой, третьей и пятой гармоник, так как амплитуды гармонических более высокого порядка настолько малы, что практически не влияют на конфигурацию импульса.

Рис. 2 показывает, что, благодаря наличию паразитных емкостей, генератор даже без всякой внешней емкостной нагрузки генерирует колебания, суммарная амплитуда которых через промежуток времени, равный 0,42 *мксек* после пробоя искровых промежутков, достигает величины, равной 1,7 nU_0.

Таким образом, для получения апериодических импульсов, пригодных для испытаний изоляции, в разрядную цепь генератора должны быть включены демпфирующие сопротивления. Очевидно, что для подавления возникающих колебаний демпфирующие сопротивления должны быть обязательно равномерно распределены по всем ступеням генератора. Как известно, введение сопротивлений в разрядную цепь гене-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ратора приводит к снижению его коэффициента использования. При расчетах следует выбирать такую оптимальную величину $R_д$, которая, с одной стороны, обеспечила бы получение апериодического импульса заданной формы, а с другой стороны не приводила бы к недопустимому снижению коэффициента использования.

Следует подчеркнуть, что величина сопротивления, необходимого для получения импульса напряжения заданной — стандартной по величине колебаний формы, может быть окончательно установлена лишь после рассмотрения процесса колебаний, возникающих в системе генератор — объект испытания, т. е. при разряде на некоторое сопротивление $Z(p) \neq \infty$.

Выбор демпфирующего сопротивления на базе анализа холостого хода генератора следует считать предварительным, преследующим цель установить нижнюю границу допустимых значений демпфирующих сопротивлений, необходимых для устранения паразитных колебаний, присущих внутренней структуре генератора. Поэтому величины сопротивлений $R_д$ (табл. 3) должны быть скорректированы в соответствии с данными, полученными при рассмотрении нагрузочного режима генератора.

Воспользовавшись уравнением (2), найдем величины сопротивлений $R_д$, необходимых для демпфирования соответствующих гармоник. Результаты подсчета, приведенные в табл. 3, показывают, что значения сопротивлений увеличиваются одновременно с $(2\nu - 1)$, стремясь, однако, к пределу:

$$\lim_{\nu \to \infty} R_\nu = R_k = 2\sqrt{L/K}.$$

Таблица 3

$2\nu - 1$	$R_д$, *ом*
1	496
3	1 020
5	1 170
∞	1 280

На рис. 3 показана форма волны генератора, построенная с помощью уравнения (1) для значения демпфирующего сопротивления $R_д = 496$ *ом*, равномерно распределенного по всем ступеням генератора (сплошная кривая). Величина $R_д$ значительно ниже необходимых значений его для подавления гармонических порядка более высокого, чем первая, все же колебания на фронте волны получаются настолько незначительными, что практически волну можно считать абсолютно гладкой — без каких бы то ни было искажающих колебаний. Это проистекает из того, что постоянная времени, определяющая затухание гармоник при $R_д = 496$ *ом*, уже обеспечивает на протяжении фронта волны достаточное затухание и без того незначительных по величине амплитуд высших гармонических.

Утвержденными в СССР нормами допускаются колебания на максимуме стандартной волны, не превышающие 5% от амплитуды апериодической слагающей импульса. Для получения импульса напряжения, удовлетворяющего стандартам, не следует стремиться выбирать демпфирующие сопротивления, исходя из условий получения абсолютно гладкой волны. На рис. 3 показана форма волны генератора импульсов, полученная при значении $R_д = 245$ *ом* (пунктирная кривая). Эта величина, как видно, не обеспечивает достаточно гладкой волны, так как накладывающиеся на апериодическую слагающую колебания достигают 13%. При величине демпфирующего сопротивления 360 *ом* (штрихпунктирная кривая) искажающие колебания не превышают 2—3%. Это значение $R_д$ можно принять, исходя из условий демпфирования колебаний, присущих внутренней структуре генератора.

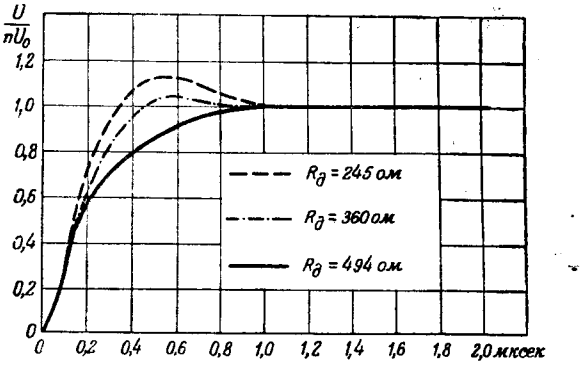

Рис. 3. Форма волны импульсного генератора при наличии демпфирующих сопротивлений.

Окончательную величину демпфирующего сопротивления следует установить, однако, лишь после анализа работы генератора импульсов на объект испытания. Она должна быть такой, чтобы колебания в системе генератор импульсов — объект испытания также были порядка 2—3%. В самом неблагоприятном случае совпадения во времени амплитуд внутренних и внешних колебаний сумма их не превысит предусмотренную нормами допустимую величину.

Приложение. Для проведения анализа описанного выше процесса зажигания генератора импульсов примем следующие, весьма близкие к действительности, условия параметры R_n, L_n, K_n, C_n отдельных ступеней равны искровые промежутки зажигаются одновременно и их сопротивления становятся равными нулю в бесконечно малый промежуток времени.

Кроме того, будем считать, что генератор состоит из бесконечного числа ступеней с константами $C_x\,dx$, K_x/dx, $L_x\,dx$ и $R_x\,dx$. Каждая ступень питается источником постоянного напряжения $U dx$. Замена рабочих емкостей равномерно распределенными вдоль длины генератора источниками постоянного напряжения не может исказить действительную картину физических процессов, протекающих в режиме холостого хода генератора. Единственными путями разряда рабочих емкостей в данном случае являются зарядные сопротивления, которые, благодаря своей большой (порядка десятков тысяч *ом*) величине, не могут существенно снизить в течение интересующего нас промежутка времени разность потенциалов, до которой были заряжены рабочие емкости к моменту пробоя искровых промежутков[4].

[4] При величине зарядного сопротивления порядка 10 000 *ом* и емкости ступени порядка 0,1 *мкф* напряжение на емкости в течение первых 5 *мксек* уменьшается не более чем на 0,01%.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

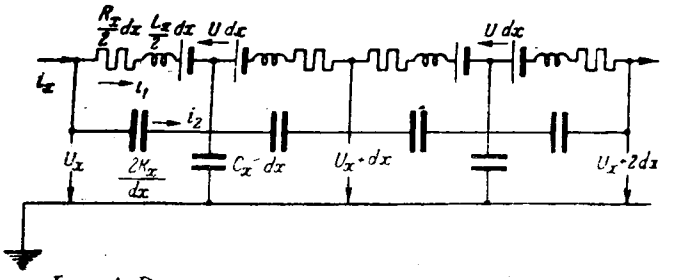

Рис. 4. Расчетная схема замещения импульсного генератора.

В соответствии с изложенным, расчетная схема замещения примет вид, представленный на рис. 4. Пользуясь приведенными на нем обозначениями, напишем дифференциальные уравнения:

$$-\frac{\partial i_x}{\partial x}=C_x\frac{\partial U_x}{\partial t}, \tag{5а}$$

$$\frac{\partial U_x}{\partial x}=U_x-i_1R_x-L_x\cdot\frac{\partial i_1}{\partial t}, \tag{5б}$$

$$i_x=i_1+i_2, \tag{5в}$$

$$i_2=-K_x\frac{\partial^2 U_x}{\partial x\partial t}. \tag{5г}$$

Путем преобразования уравнения (5б) и подстановки в него соответствующих выражений можно получить следующее дифференциальное уравнение в операторной форме:

$$\frac{\partial^2 U_x(p)}{\partial x^2}[1+pR_xK_x+p^2L_xK_x]-$$

$$-U_x(p)[pR_xC_x+p^2L_xC_x]=0, \tag{6}$$

где $U_x(p)$ является функцией как x, так и p.

Это уравнение может быть решено путем известной подстановки

$$U_x(p)=A(p)\,e^{\sigma x}, \tag{7}$$

где

$$\sigma=\pm\sqrt{\frac{pC_x(pL_x+R_x)}{pK_x(pL_x+R_x)+1}}, \tag{7а}$$

после чего имеем:

$$U_x(p)=A_1(p)\,e^{\sigma x}+A_2(p)\,e^{-\sigma x}. \tag{8}$$

Величины $A_1(p)$ и $A_2(p)$ могут быть определены из пограничных условий: при $x=0$, $U_x(p)=0$ и $A_1(p)=-A_2(p)$; при $x=l$, $I_x(p)=0$, откуда следует после некоторых преобразований, используя уравнения (5б), (5в) и (5г):

$$A_1(p)=\frac{U}{2\sigma l\cos\sigma l\,[pK_x(pL_x+R_x)+1]}. \tag{9}$$

После чего из уравнения (8) получим:

$$U_x(p)=\frac{U\sin\sigma_x}{\sigma l\cos\sigma l\,[pK_x(pL_x+R_x)+1]} \tag{10}$$

и для наивысшей точки генератора при $x=l$ имеем суммарное напряжение, выраженное пока при помощи оператора p:

$$U_{(p)}=\frac{U\operatorname{tg}\sigma l}{\sigma l\,[pK_x(pL_x+R_x)+1]}. \tag{11}$$

Для решения уравнения (11) воспользуемся теоремой разложения:

$$U_{(t)}=\frac{U}{Z_{(p=0)}}+U\sum_{\nu=1}^{\nu=\infty}\frac{e^{p_\nu t}}{p_\nu\left(\frac{dZ}{dp_\nu}\right)}, \tag{12}$$

где

$$Z_{(p)}=\frac{\sigma l}{\operatorname{tg}\sigma l}[pK_x(pL_x+R_x)+1] \tag{12а}$$

и

$$Z_{(p=0)}=1. \tag{12б}$$

Выразим наши элементарные константы R_x, K_x, C_x и L_x через суммарные константы всего генератора:

$$\left.\begin{aligned}C_x&=\frac{NC}{l}=\frac{C}{l},\\K_x&=\frac{K}{N}\,l=Kl,\\L_x&=\frac{LN}{l}=\frac{L}{l},\\R_x&=\frac{RN}{l}=\frac{R_\partial}{l}.\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

Рациональные корни p_ν уравнения $Z_{(p_\nu=0)}$ могут быть найдены с помощью выражений (7а) и (13) путем подстановки

$$j\sigma l=\theta=j\sqrt{\frac{pN^2C(pL+R_\partial)}{[pK(pL+R_\partial)+1]}}, \tag{14}$$

тогда

$$Z_{(p_\nu)}=\frac{\theta}{\operatorname{tg}\theta_\nu}\cdot\frac{N^2C}{(N^2C+\theta^2_\nu\cdot K)}=0, \tag{15}$$

и

$$\theta_\nu=\frac{(2\nu-1)\pi}{2}, \tag{15а}$$

где ν может принимать любые значения от $+1$ до $+\infty$, тогда окончательно после несложных преобразований значения p_ν напишутся:

$$p_{\nu(1,2)}=-\frac{R_\partial}{2L}\pm\sqrt{\frac{R^2_\partial}{4L^2}-\frac{1}{L\left(K+\frac{4C}{(2\nu-1)^2\pi^2}\right)}}. \tag{16}$$

Обозначая подкоренное выражение через $j\omega$, получим круговые частоты всех гармоник, присущие волне импульсного генератора при его работе в режиме холостого хода:

$$\omega_\nu=\sqrt{\frac{1}{L\left(K+\frac{4C}{(2\nu-1)^2\pi^2}\right)}-\frac{R^2_\partial}{4L^2}}. \tag{17}$$

Для окончательной расшифровки уравнения (11) с помощью теоремы разложения необходимо написать выражения dZ/dp_ν, для этого прибегаем к уравнениям (14) и (16), из которых после преобразований имеем:

$$\frac{dZ}{dp_\nu}=\left(\frac{dZ}{d\theta}\right)\cdot\left(\frac{d\theta}{dp_\nu}\right)=\pm j\omega_\nu L(C+\theta^2_\nu K), \tag{18}$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

откуда следует:

$$p_\nu\left(\frac{dZ}{dp_\nu}\right)_1=\omega_\nu(C+\theta^2_\nu K)\left(-j\frac{R_\partial}{2}-\omega_\nu L\right) \quad (19а)$$

и

$$p_\nu\left(\frac{dZ}{dp_\nu}\right)_2=\omega_\nu(C+\theta^2_\nu K)\left(+j\frac{R_\partial}{2}-\omega_\nu L\right). \quad (19б)$$

После подстановки полученных выше выражений в уравнение (12) напишем окончательно решение для напряжения в наивысшей точке генератора импульсов

$$U_{(t)}=U\times$$
$$\times\left[1-e^{-\frac{t}{2T_L}}\sum_{\nu=1}^{\nu=\infty}\frac{\sin\omega_\nu t+2\omega_\nu T_L\cos\omega_\nu t}{\frac{\omega_\nu T_L}{4}\left(1+4\omega^2_\nu T^2_L\right)\left(1+\frac{(2\nu-1)^2\pi^2}{4\varkappa^2}\right)}\right].$$

Литература

1. M. C. Avley & F. R. Benedict. Electrical Journal, vol. 30, стр. 323, August 1933.
2. R. Elsner. V. D. E. Fachbericht, т. 8, стр. 159, Juli 1936.

[9. 2. 1950]

✧ ✧ ✧

Расчет импульсных градиентов в многокатушечных трансформаторных обмотках

Кандидат техн. наук Е. С. ФРИД

Московский трансформаторный завод им. Куйбышева

Данные опыта с несомненностью доказывают волновой характер импульсных градиентов в трансформаторах. Это дает возможность разработать сравнительно простой метод их расчета. Исходя из представления о движении волн электрического поля по обмотке в двух направлениях, дается вывод конечных выражений для градиентов как при прямоугольном импульсе, так и при более сложных воздействиях. Результаты расчетов хорошо сходятся с опытом.

Введение. Как было показано автором [Л. 5], опыт с несомненностью свидетельствует о волнообразном распространении импульсных градиентов в многокатушечных трансформаторных обмотках[1]. Попытаемся выработать на этой основе достаточно простой метод количественного расчета градиентов. Необходимость такого метода очевидна — именно градиенты от атмосферных перенапряжений определяют изоляцию между элементами обмотки высшего напряжения.

Отсутствие удовлетворительной методики расчета импульсных градиентов, несмотря на интенсивное теоретическое исследование вопроса перенапряжений в трансформаторах в течение последних десятилетий, объясняется в значительной степени тем, что господствующая трактовка этих перенапряжений, как суммы гармонических колебаний, непригодна для данной цели: гармонический ряд для градиентов сходится очень медленно.

Вопрос о возможности применения здесь волновой трактовки, дающей возможность получить все интересующие нас величины в виде конечных выражений, был подробно рассмотрен А. Г. Перлиным [Л. 3]. Он показал, что условием движения по обмотке неискажающихся волн зарядов и поля является так называемая дуальность обмотки. Этот термин означает полное геометрическое подобие магнитного поля тока в каком-либо витке и электрического поля заряда, распределенного по тому же витку: в любой меридианной плоскости магнитные силовые линии совпадают с электрическими линиями уровня и обратно. Обмотку высшего напряжения трансформатора можно считать дуальной только в том случае, если расположенную внутри нее обмотку низшего напряжения заменить сплошным металлическим заземленным цилиндром — экраном. Такой экран непроницаем для быстро переменного магнитного поля и явится поверхностью как постоянного электрического потенциала, так и постоянного магнитного потока.

Как показал В. А. Карасев [Л. 1, 2], разница в токораспределении реальной закороченной обмотки низшего напряжения и сплошного экрана обусловливает нарушение дуальности поля трансформатора в первом случае и приводит к значительным изменениям величины и формы потенциалов высшего напряжения по сравнению с волновой картиной [Л. 5].

То обстоятельство, что для градиентов волновая трактовка все же сохраняется, может быть объяснено следующим образом. Как видно из [Л. 5], кривая зависимости градиента от времени имеет вид резкого кратковременного пика. Подобный же характер имеет пространственное распределение градиентов: в каждый данный момент градиент имеет заметную величину лишь в небольшой зоне обмотки. Имеются два фактора, которые для этих малых интервалов времени (порядка 1 *мксек*) и для ограниченных областей стремятся приблизить обмотку низшего напряжения к сплошному экрану, а именно: а) междувитковые емкости обмотки низшего напряжения, как бы «закорачивающие» между собой ее витки; б) вихревые токи в листах сердечника, стремящиеся не пропустить магнитные линии через обмотку низшего напряжения в сталь.

[1] Под „градиентами" подразумеваются напряжения на малых участках обмотки.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Эти факторы создают в известной мере **местную дуальность поля** в зоне пика градиента и, таким образом, дают ему возможность распространяться с постоянной скоростью. Кроме того, нужно иметь в виду следующее обстоятельство. Токи обмотки низшего напряжения создают в обмотке высшего напряжения магнитное поле, слабое сравнительно с тем местным полем, с которым связан пик градиента. Поэтому влияние изменения токораспределения по обмотке низшего напряжения (при переходе от сплошного экрана к реальной обмотке) скажется тем заметнее, чем больший участок обмотки высшего напряжения мы будем рассматривать.

Критика существующих теорий. Покажем, что существующие волновые теории перенапряжений в трансформаторах не могут служить базой для расчета градиентов. Не считая явно устаревших, здесь нужно рассмотреть две работы 1940 г. — А. Г. Перлина [Л. 3] и Р. Рюденберга (R. Rüdenberg [Л. 6]). Как указывалось, А. Г. Перлин выдвигает положение, что в дуальной обмотке заряды и поле распространяются в форме неискажающихся волн. В дальнейшем он делает, однако, необоснованное предположение о движении этих волн только в одном направлении: от начала вглубь обмотки. В отношении градиентов это приводит к недопустимым выводам: амплитуда градиентов в случае прямоугольного импульса получается постоянной для всей обмотки, тогда как опыт указывает на ее резкое спадание при удалении от начала. Как мы увидим ниже, это противоречие исчезает, если учесть оба возможных направления движения волн.

В противоположность А. Г. Перлину, правильно связывающему волновые свойства обмотки с ее дуальностью, Р. Рюденберг, следуя Вагнеру [Л. 6], пренебрегает взаимоиндукцией отдельных катушек обмотки, хотя учитывает их емкостную связь. Это нелогичное допущение устраняет, в сущности, дуальность и делает невозможным вывод волновых уравнений. Лишь путем грубых допущений Рюденберг приходит к следующей упрощенной картине явления. При воздействии на обмотку прямоугольного импульса в ней возникают одновременно две составляющие потенциала (рис. 1): неподвижное емкостное распределение *I*, постепенно затухающее со временем, и волна косоугольного фронта *II*, движущаяся с постоянной скоростью вглубь обмотки. Эта схема также расходится с опытом во многих отношениях, например:

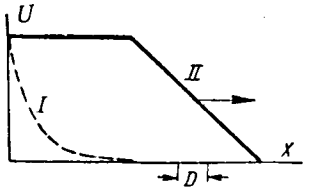

Рис. 1. Составляющие потенциала (по Рюденбергу).

1) по Рюденбергу — амплитуда градиента в глубине обмотки пропорциональна длине участка (числу катушек), фактически амплитуда растет значительно медленнее (ниже рис. 6);

2) по Рюденбергу — длительность градиента в глубине обмотки не зависит от длины участка, фактически длительность резко растет при увеличении длины (ниже рис. 6).

Все сказанное относительно неудовлетворительности теории Рюденберга относится, разумеется, и к взглядам ряда иностранных авторов, целиком применяющих эту теорию.

Основы предлагаемого метода. Автору удалось разработать достаточно простой и удовлетворительно сходящийся с опытом метод расчета градиентов, к изложению которого мы приступаем.

Приняты следующие предположения относительно характера обмотки высшего напряжения.

1. Обмотка состоит из большого числа одинаковых дисковых катушек (разделение их на витки не учитываем, что лишает нас возможности исследовать явления внутри катушек, рис. 2).

2. Обмотка предполагается бесконечно простирающейся от начала. Таким образом, отражение от нейтрали не учитывается, т. е. рассматривается только первый пик градиента. Это отражение в дальнейшем будет рассмотрено особо.

3. В начале обмотки предполагается так называемое емкостное кольцо — разрезная шайба, имеющая линейный потенциал (рис. 2). Не меняя существенно характера явлений, это предположение упрощает выводы.

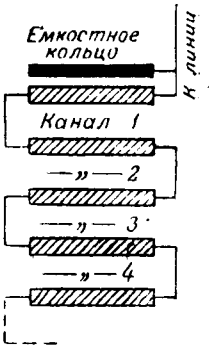

Рис. 2. Многокатушечная обмотка.

4. Пренебрегаем активными сопротивлениями и проводимостями.

5. Согласно вышеуказанному, считаем обмотку низшего напряжения, расположенную внутри обмотки высшего напряжения, эквивалентной сплошному экрану; таким образом, предполагаем поле обмотки высшего напряжения дуальным. Это предположение верно только в том случае, если ограничиться рассмотрением малых участков обмотки и, следовательно, отказаться от исследования потенциалов. Градиент на небольшом участке будем поэтому рассматривать совершенно независимо от потенциала,— как интеграл напряженности электрического поля в проводе по его длине:

$$g(X, t) = \int_{X}^{X+D} E(X, t)\, dX, \qquad (1)$$

где X — длина провода от начала обмотки;
t — время от начала явления;
D — длина провода на участке;
E — напряженность электрического поля в проводе;
g — градиент.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Предполагаем воздействие на обмотку прямоугольного импульса напряжения, амплитуду которого примем за единицу. В этом случае величина градиента будет выражена в долях амплитуды. Предположение о дуальности обмотки позволяет представить напряженность поля волновой функцией:

$$E(X,\ t)=E(X\pm Vt)=\varphi(X-Vt)+ +k\varphi(X+Vt); \qquad (2)$$

здесь V — скорость волны вдоль провода, равная электромагнитной скорости данной изоляционной среды. Знак $\pm$ при Vt указывает на возможность движения волны в двух направлениях; отсюда следует, что E может быть представлено суммой прямой и обратной волны, как это сделано в правой части равенства (2); k — неизвестное пока отношение амплитуд этих волн.

Аналогичную формулу напишем для магнитного потока, связанного с любым витком обмотки:

$$\Phi(X,\ t)=\Phi(X\pm Vt)= =\psi(X-Vt)+i\psi(X+Vt) \qquad (3)$$

Связь между E и Φ, получим, приравняв перепад потенциала на длине витка l_w наводимой в нем э. д. с.

$$E(X,\ t)\,l_w=-\frac{\partial\Phi(X,\ t)}{\partial t}. \qquad (4)$$

Считаем E неизменным на длине витка ввиду ее малости.

В начальный момент магнитный поток во всей обмотке должен равняться нулю, как и во всякой индуктивности:

$$\Phi_н(X)=\Phi(X,\ 0)=0. \qquad (5)$$

Подставив $t=0$ в уравнение (3), получим $i=-1$. Подставляя затем (2) и (3) в (4), найдем $k=1$.

Прямая и обратная волна напряженности электрического поля одинаковы по знаку и равны по амплитуде. Для начального момента получим из уравнения (2):

$$E_н(X)=E(X,\ 0)=2\varphi(X),$$

откуда

$$E(X,\ t)=\frac{1}{2}[E_н(X-Vt)+E_н(X+Vt)]. \qquad (2a)$$

Для определения вида функции $E_н(X)$ воспользуемся общеизвестной формулой емкостного распределения потенциала по бесконечной обмотке (в момент приложения единичного прямоугольного импульса напряжения к линейному концу):

$$u_н(x)=e^{-\alpha x};\ u_н(X)=e^{-AX};$$

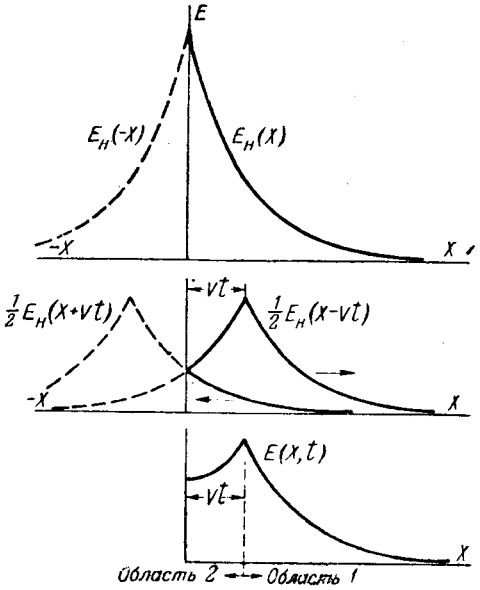

Рис. 3. Волны напряженности поля.

где x — расстояние от начала вдоль оси,

$$\alpha=\frac{1}{h}\sqrt{\frac{C_1}{K_1}}.$$

$$A=\frac{h}{l_к}\alpha=\frac{1}{l_к}\sqrt{\frac{C_1}{K_1}};$$

здесь h — расстояние между катушками вдоль оси;

$l_к$ — длина провода катушки;

C_1 — емкость одной катушки на землю;

K_1 — емкость между соседними катушками.

Отсюда получим:

$$E_н(X)=-\frac{du_н(X)}{dX}=Ae^{-AX}. \qquad (6)$$

Формула (2a) показывает, что эта начальная кривая напряженности поля разделяется на две волны половинной амплитуды, которые начинают двигаться в разные стороны. Нужно также учесть, что обратная волна, движущаяся к началу, отражается от него без перемены знака, как от точки фиксированного потенциала (постоянный единичный потенциал). Легко видеть, что это равносильно четному продолжению кривой $E_н(X)$ за начало обмотки (рис. 3), т. е. условию

$$E_н(Z)=E_н(-Z).$$

С учетом этого равенства получим при подстановке (6) в (2a)

$$E(X,\ t)=\frac{1}{2}\left[e^{-A|X-Vt|}+e^{-A|X+Vt|}\right]. \qquad (7)$$

Из рис. 3 видно, что максимальное значение напряженности поля имеет место в точке

$$X=Vt,$$

и что вся обмотка может быть разбита на 2 области: спереди и сзади движущегося максимума.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

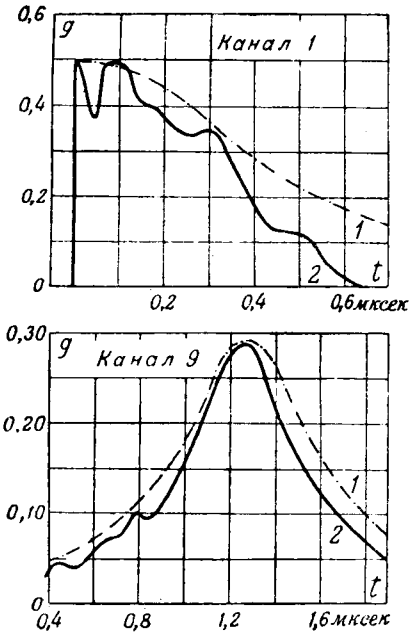

Рис. 4. Форма градиентов.
1 — по расчету; *2* — по осциллограмме.

Градиенты прямоугольного импульса. Для перехода от напряженности поля к градиенту на участке с малой конечной длиной D производим интегрирование выражения (7) по формуле (1). Следует различать три интервала времени; для каждого из интервалов формулы градиента будут иметь несколько иной вид. Приводим формулы для всех интервалов.

1-й интервал. Максимум E не дошел до начала участка (участок в первой области),

$$Vt < X,$$

$$g_1 = \left(1 - e^{-AD}\right) e^{-AX} \operatorname{ch} AVt. \qquad (8а)$$

2-й интервал. Максимум E в пределах участка,

$$X < Vt < (X + D),$$

$$g_2 = 1 - \frac{1}{2} e^{-A(X+D)} e^{AVt} - \frac{1}{2}\left[e^{AX} - e^{-AX}\left(1 - e^{-AD}\right)\right] e^{-AVt}. \qquad (8б)$$

3-й интервал. Максимум E миновал участок (участок во 2-й области), $Vt > (X + D)$,

$$g_3 = \frac{1}{2}\left(1 - e^{-AD}\right)\left(e^{A(X+D)} + e^{-AX}\right) e^{-AVt}. \qquad (8в)$$

При достаточном удалении от начала обмотки ($AX \gg 1$) можно отбросить второе слагаемое в выражении (7), иными словами, пренебречь обратной волной напряженности поля. В этом случае и выражение градиента станет функцией только от $(X - Vt)$, т. е. будет соответствовать одной прямой волне. Например, формула градиента в первом интервале в случае $AX \gg 1$ примет вид:

$$g_1' = \frac{1}{2}\left(1 - e^{-AD}\right) e^{-A(X - Vt)}. \qquad (9а)$$

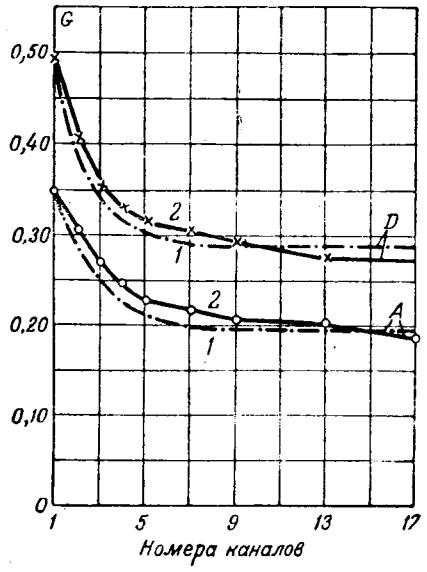

Рис. 5. Амплитуды градиентов для вариантов A и D (прямоугольная волна).
1 — по расчету, *2* — опытная.

Соответственно упростятся и формулы для других интервалов.

На рис. 4 дано сравнение кривых градиента в функции времени, рассчитанных по формулам (9), и опытных кривых, построенных на основе осциллограмм, для экспериментальной модели многокатушечной обмотки, условно обозначаемой ИМО-3. Катушка близка по своим параметрам к реальным высоковольтным трансформаторам (см. приложение в конце статьи, также [Л. 5]). При расчете приняты опытные значения величин A и V.

Из формул (8) видно, что градиент растет со временем в первом интервале и падает в третьем. Следовательно, он имеет максимум во втором интервале. Момент этого максимума t_m и величина его G могут быть найдены обычным путем. Для них получатся следующие выражения:

$$t_m = \frac{X + D/2}{V} + \frac{1}{2AV} \ln\left[1 - \left(1 - e^{-AD}\right) e^{-2AX}\right], \qquad (10)$$

$$G = 1 - \sqrt{e^{-AD}\left[1 - \left(1 - e^{-AD}\right) e^{-2AX}\right]}. \qquad (11)$$

Второе слагаемое в формуле (10) быстро исчезает при росте X. Поэтому уже при сравнительно небольшом удалении от начала t_m становится пропорциональным величине $(X + D/2)$ — расстоянию до середины участка.

Как видно из (11), расчетная амплитуда градиента по мере удаления от начала обмотки сперва снижается, затем,— практически после нескольких каналов,— она принимает неизменное значение. На рис. 5 дано сравнение расчета по формуле (11) с данными измерений для первой трети обмотки модели ИМО-3 при двух ее вариантах: A — равномерная обмотка, $Д$ — 5 первых междукатушечных каналов увеличены.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

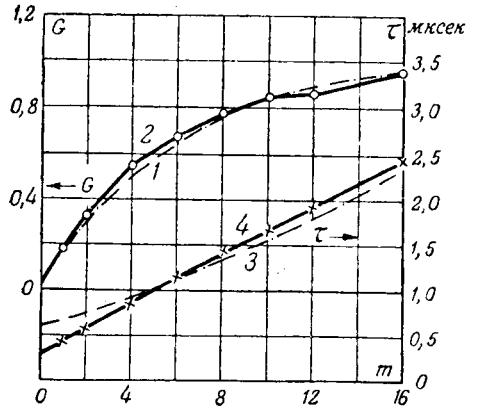

Рис. 6. Влияние длины участка.
m — число катушек (начиная с 7-й); G — амплитуда; τ — длительность. *1, 3* — по расчету; *2, 4* — опытные.

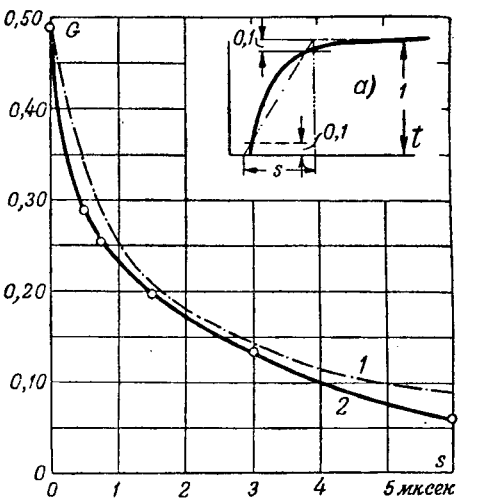

Рис. 7. Влияние длины фронта на градиент первого канала.
1 — по расчету, *2* — опытная.

Совпадение получилось одинаково хорошим в обоих случаях. Это доказывает применимость метода и к несколько неравномерной обмотке. Все дальнейшие данные относятся именно к неравномерному варианту *Д* модели ИМО-3. При дальнейшем углублении в обмотку совпадение ухудшается вследствие потерь энергии, не учитываемых формулами. Опытные значения градиентов становятся на 25—30% ниже расчетных. Однако на практике интерес представляют именно градиенты в начале обмотки. Хотя при выводе мы предполагали малую длину участка AD, на практике, как видно из рис. 6, совпадение расчетных и опытных амплитуд градиентов сохраняется при росте D (числа катушек на участке) вплоть до градиента, равного примерно 0,9 от приложенного импульса.

Из формул (8) легко рассчитать также длительность пика градиента τ — время, в течение которого градиент больше половины своей амплитуды. Сравнение расчетной и опытной длительности при разных длинах участков также дано на рис. 6.

Градиенты при сложных формах воздействия. Предположим, что приложенное в начале обмотки напряжение изменяется по закону $u_0(t)$. В этом случае градиент g на каком-либо участке может быть найден по известному градиенту прямоугольного единичного импульса на том же участке — g_n с помощью известного интеграла Дюамеля, который здесь удобно представить в следующем виде:

$$g(X,t)=u_0(0)g_n(X,t)+\int_0^t g_n(X,t-\vartheta)\,du_0(\vartheta). \quad (12)$$

Рассмотрим сперва бесконечный импульс с пологим фронтом, который может быть выражен следующей формулой:

$$u_0=1-e^{-pt}. \quad (13)$$

Условная длительность фронта s находится согласно рис. 7,*а*. Как известно [Л. 4], $s=2{,}75/p$.

Подставив выражение (13) в (12), получим формулы градиентов, которые приводим ниже для всех трех интервалов. Для упрощения здесь введен безразмерный параметр

$$\sigma=\frac{AV}{p}=0{,}364AV\cdot s,$$

который характеризует относительную пологость фронта для данной обмотки.

1-й интервал $Vt<X$;

$$g_1=\frac{1-e^{-AD}}{1-\sigma^2}e^{-AX}\times$$
$$\times\left[\frac{1-\sigma}{2}e^{AVt}+\frac{1+\sigma}{2}e^{-AVt}-e^{-pt}\right] \quad (14а)$$

2-й интервал $X<Vt<(X+D)$;

$$g_2=1-\frac{1}{1-\sigma^2}\left\{\frac{1-\sigma}{2}e^{-A(X+D)}e^{AVt}+\right.$$
$$+\frac{1+\sigma}{2}\left[e^{AX}-e^{-AX}(1-e^{-AD})\right]e^{-AVt}-$$
$$\left.-[\sigma^2e^{AX/\sigma}-e^{-AX}(1-e^{-AD})]e^{-pt}\right\}. \quad (14б)$$

3-й интервал $Vt>(X+D)$:

$$g_3=\frac{1}{1-\sigma^2}\left\{\frac{1+\sigma}{2}(e^{A(X+D)}+e^{-AX})(1-e^{-AD})e^{-AVt}-\right.$$
$$\left.-[\sigma^2e^{A(X+D)/\sigma}(1-e^{-AD/\sigma})+e^{-AX}(1-e^{-AD})]e^{-pt}\right\}. \quad (14в)$$

Помимо волновых членов вида $f(X\pm Vt)$, здесь появляется во всех интервалах добавочный член

$$\frac{1-e^{-AD}}{1-\sigma^2}e^{-(AX+pt)}.$$

Однако при достаточном удалении от начала этим членом можно пренебречь, равно как и членами обратной волны, и градиент будет являться прямой волной, т. е. функцией от $(X-Vt)$. Сказанное справедливо для всех видов воздействия.

Максимум градиента по формулам (14) может иметь место как во втором, так и в третьем

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

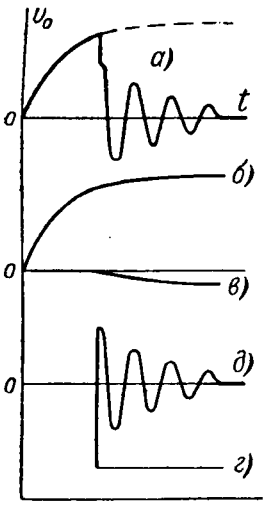

Рис. 8. Составляющие срезанного импульса.

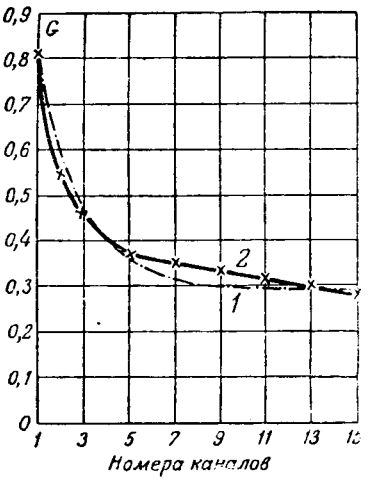

Рис. 9. Амплитуды градиентов при срезанном импульсе
1 — по расчету, 2 — по опыту.

интервалах. Однако только в последнем случае (который на практике является преобладающим) момент и величина максимума могут быть найдены аналитически. Они имеют тогда следующие выражения:

$$t_m = \frac{X+D}{V} + \frac{1}{AV}\frac{\sigma}{1-\sigma}\ln M, \qquad (15)$$

$$G = \frac{1}{2}(1-e^{-AD})(1+e^{-A(2X+D)})\,M^{-\frac{\sigma}{1-\sigma}}, \qquad (16)$$

где

$$M = \frac{2}{\sigma(1+\sigma)}\,\frac{\sigma^2(1-e^{-\frac{AD}{\sigma}}) + e^{-\frac{A}{\sigma}[(1+\sigma)X+D]}(1-e^{-AD})}{(1-e^{-AD})(1+e^{-A(2X+D)})}. \qquad (17)$$

Согласно вышесказанному, формулы (15) и (16) верны лишь при условии

$$Vt_m > (X+D), \text{ что равносильно } M^{\frac{\sigma}{1-\sigma}} > 1.$$

Выражение (13), лежащее в основе этих выводов, относится к бесконечному импульсу, но на практике полученные формулы применимы и для конечных импульсов с пологим фронтом (например, для стандартной волны 1,5/40 *мксек*), поскольку их длина почти не влияет на градиенты [Л. 5].

На рис. 7 дано сравнение расчета по формулам (16) и (17) и опытных данных для зависимости амплитуды градиента на первом канале обмотки ИМО-3 от фронта *s*. При $\sigma = 1$ все вышеприведенные выражения обращаются в неопределенности, которые, однако, легко раскрыть обычным методом.

Подобным же образом с помощью равенства (12) получаются формулы градиентов колебательного затухающего импульса

$$u_0 = e^{-(r \pm j\omega)t} \qquad (18)$$

Помимо затухающих апериодических членов, эти формулы будут содержать также колебательные члены:

экспоненциальный — вида

$$e^{-(r \pm j\omega)t} \cdot e^{-AX},$$

волновой — вида

$$e^{-(r \pm j\omega)(t - X/V)}.$$

При достаточно высокой частоте $\omega \gg AV$ преобладает первый из них, при достаточно низкой частоте $\omega \ll AV$ — преобладает второй.

Рассмотрим теперь более сложную форму воздействия: колебательный срез импульса с пологим фронтом (рис. 8,*а*), который обычно имеет место при импульсных испытаниях. Легко видеть, что это воздействие может быть представлено, как сумма более простых: импульсов с пологим фронтом (рис. 8,*б*, *в*), прямоугольного импульса обратного знака (рис. 8,*г*) и колебательного импульса (рис. 8,*д*). Мы можем найти градиент для каждой из этих составляющих и, просуммировав их, получим градиент срезанного импульса. Нахождение амплитуды этого суммарного градиента в общем виде затруднительно. Однако для тех высоких частот колебаний, которые обычно имеют место при срезе, можно принять, что по крайней мере один полупериод колебательной составляющей градиента того же знака, что и апериодический максимум, и находится достаточно близко от него, так что их амплитуды складываются арифметически.

Найденные таким образом величины градиентов среза для разных каналов сравнены на рис. 9 с измеренными величинами.

Градиенты вблизи нейтрали. При выводе всех приведенных здесь формул обмотка предполагалась бесконечной. Предложенные формулы не могут дать картины градиентов вблизи нейтрального конца. Для этого необходимо специальное решение. Можно применить метод, аналогичный тому, который был использован выше: при рассмотрении явлений у нейтрального конца считать линейный конец бесконечно удаленным. Иными словами, пренебречь взаимным влиянием концов обмотки. Как указывалось выше, на некотором расстоянии от начала нужно учитывать движение по обмотке только лишь прямой волны градиента.

Таким образом, можно рассматривать падение на нейтраль волны напряженности поля из бесконечной обмотки. От заземленной нейтрали волна отразится без перемены знака. Опыт показывает, однако, что таким же образом происходит отражение и от изолированной нейтрали, очевидно из-за приземляющего действия емкости последней катушки на ярмо и сердечник [Л. 5]. Итак, градиент вблизи нейтрали может быть представлен суммой падающей и отраженной волны. Выведенные таким образом формулы дают качественно совпадение с опытом. В частности, они обнаруживают возрастание амплитуды градиентов у нейтрали («подброс»), наблюдаемое на всех трансформаторах [Л. 5]. При доста-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

точно пологом фронте воздействующего импульса градиенты у нейтрали оказываются значительно выше, чем в начале обмотки.

Применимость метода. Приведенный экспериментальный материал относится к несколько упрощенной модели. В реальных трансформаторах имеется ряд осложняющих факторов: уменьшенное число витков во входных катушках, отсутствие емкостного кольца, выключение части обмотки при регулировке числа витков и т. п. Поэтому совпадение расчета с опытом здесь обычно несколько хуже. Однако основные закономерности и порядок величин правильно передаются приведенными формулами. В ряде случаев для дальнейшего уточнения могут потребоваться эмпирические поправки в зависимости от конструкции трансформатора. В общем можно констатировать, что предлагаемый метод дает наглядную картину процессов, определяющих импульсные градиенты в трансформаторах, выясняет роль различных факторов, влияющих на эти градиенты, и позволяет хотя бы приблизительно оценить их величину и длительность. Поэтому данный метод безусловно может служить базой для расчета импульсных градиентов.

Приложение. Некоторые данные модели ИМО-3. Расстояние между обмотками высшего и низшего напряжений составляет 4,6 *см*; высота обмоток — 68 *см*. Обмотка высшего напряжения имеет емкостное кольцо; число дисковых катушек — 52; витков в катушке — 22; средний диаметр — 45,2 *см*; радиальная ширина 4,4 *см*; нормальные межкатушечные каналы — 0,75 *см*; входные каналы (вариант *Д*): 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0 *см*; провод — 4,4 × 1,35 *мм*, изоляция 0,25 *мм* на сторону; длина провода катушки — 31,2 *м*. Обмотка низшего напряжения имеет всего 48 витков; провод — 9,9 × 2,44 *мм* в 3 параллели (см. также [Л. 5]).

Литература

1. В. А. Карасев. Теория электромагнитных процессов в обмотках. Госэнергоиздат, 1947.
2. В. А. Карасев. Теория расчета перенапряжений в обмотках трансформаторов. Электричество, № 11—12, 1944.
3. А. Г. Перлин. Нестационарные явления в обмотке с изолированной нейтралью. Диссертация, МЭИ, 1940.
4. Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений, выпуск III. Перенапряжения, глава 6. Госэнергоиздат, 1945.
5. Е. С. Фрид. Основные эмпирические закономерности импульсных градиентов в обмотках трансформаторов. Электричество, № 3, 1947.
6. R. Rüdenberg. Действие движущихся волн в катушках и обмотках. Trans. of AIEE, стр. 1031, 1940.

[13. 10. 1949]

✧ ✧ ✧

Взрывобезопасные штепсельные соединения для кабелей угольных шахт

Инж. В. Т. СНАГИН

Всесоюзный научно-исследовательский угольный институт

Рассмотрены основные недостатки применяемого в угольной промышленности штепсельного устройства ШВ-9677. Обоснована новая конструкция контактного взрывобезопасного сочленения ШВ-9678 ВК.

Междуфазные короткие замыкания внутри штепселя могут возникнуть или в результате попадания влаги внутрь штепселя или в результате нарушения электрической цепи между токоведущими элементами штепселя. В первом, весьма редком, случае аварии будут иметь место при любой системе контактов и могут быть предотвращены только путем абсолютной их герметизации. Во втором случае причины объясняются конструктивными недостатками самих штепсельных устройств и в меньшей мере действием внешних факторов (вибрация, окисление, загрязнение и пр.).

Существующая конструкция типа ШВ-9677 показана на рис. 1. Пружины *3* сжимают разрезные стенки гнезда *1* и при включенном положении должны обеспечить необходимое прижатие контактных поверхностей гнезда и пальца *2*. На первый взгляд технически правильное и компактное устройство системы контакта в действительности не отвечает предъявленным к нему требованиям и является первопричиной большинства аварий штепсельных устройств. Испытания на нагрев штепсельных устройств этой системы дают вполне удовлетворительный результат, отвечающий нормам для соответствующих образцов муфт; однако после определенного числа повторных включений тепловой режим штепселя резко меняется в сторону ухудшения. По данным испытаний лаборатории горного электрооборудования Всесоюзного научно-исследовательского угольного института (ВУГИ) перегрев контактной системы штепселя ШВ-9677, заключенной в металлический корпус, после тысячи включений достигает 90—100° С против 35—40° С до производства включений; по данным Кемеровского электромеханического завода величина перегрева указывается в пределах 75—80° С. Такое резкое увеличение перегрева показывает, что величина переходного сопротивления между контактными поверхностями резко увеличивается. Последнее обстоятельство весьма характерно для штепсельных устройств существующих конструкций и может быть объяснено остаточными деформациями пружин. Объяснение перегрева штепсельных устройств этого типа действием индуктивных токов, возникающих в пружинах, более чем сомнительно (А. Я. Буйлов, Основы электроаппаратостроения. ГЭИ, 1946). Коренного улучшения эксплоатационных качеств штепселя,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

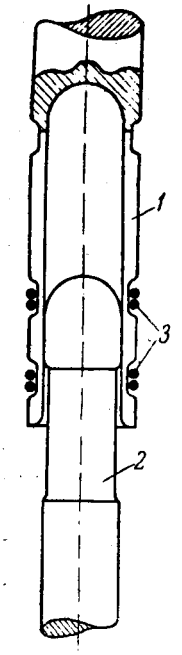

Рис. 1. Схема контактного соединения штепселя ШВ-9677.
1 — разрезное гнездо; 2 — контактный палец; 3 — обжимные пружины

очевидно, можно добиться только путем исключения самих причин, порождающих аварии, т. е. путем изменения конструкции контакта.

Величина переходного сопротивления контакта с достаточной степенью точности может быть выражена следующим отношением:

$$R_{пер} = \frac{\varepsilon}{Q^n} [ом],$$

где: ε — сопротивление контакта при давлении $Q = 1$ *кг*, величина ε, определяемая экспериментальным путем, характеризует состояние контактных поверхностей (обработка, окисление, загрязнение) и физические свойства материала;

Q — сила нажатия на контакты;

n — показатель степени, для точечного контакта он равен 0,5, для многоточечного, как показывает опыт, близок к единице.

Величина ε в свою очередь зависит от величины давления Q, поэтому приведенная формула, правильно отражая явление с качественной стороны, дает лишь приближенное значение переходного сопротивления.

Несомненным является лишь то, что при всех прочих равных условиях для данной системы контакта величина его переходного сопротивления будет уменьшаться с увеличением давления на контакты. Однако закономерность этого вывода относительна и справедлива только для определенных условий. Для ориентировочных расчетов системы плоских медных контактов, зачищенных наждачным полотном, можно пользоваться следующей эмпирической формулой:

$$R_{пер} = \frac{0{,}9 \cdot 10^{-4}}{Q}.$$

Приведенная формула дает зависимость переходного сопротивления $R_{пер}$ от величины нажатия контактных поверхностей при увеличении давления от долей килограмма до 25 *кг*, т. е. в пределах действительных значений давлений, которые имеют место в рабочих аппаратах. Интересным является то обстоятельство, что при уменьшении давления от 25 *кг* до долей килограмма те же значения переходных сопротивлений не получаются: кривая при уменьшении давления идет ниже кривой, полученной при увеличении давления. Данные опыта лишний раз подтверждают, что зона перехода тока от одного тела к другому находится в прямой зависимости от состояния контактных поверхностей, которые в момент увеличения давления изменились (смялись), т. е. микроструктура контакта претерпела изменение в сторону уменьшения переходного сопротивления. Можно утверждать, что при увеличении давления количество точек соприкосновения увеличилось (неровности дали остаточные деформации) против количества точек соприкосновений в начале опыта, и кривая переходного сопротивления контакта естественным образом должна была пройти ниже. Можно также утверждать, что при увеличении числа повторных включений штепселя расхождение кривых будет уменьшаться и при некотором конечном числе включений должно наступить такое положение, когда при одном и том же давлении на контактные поверхности величина переходного сопротивления будет практически постоянной, а с количественной стороны — минимальной для данной системы контакта. Следовательно, сам процесс включения и выключения штепселя, в результате которого количество точек соприкосновения увеличивается, является благоприятным, улучшающим зону перехода тока из одного тела в другое. Однако надо помнить, что тщательная обработка контактных поверхностей (шлифовка и полировка) не дает уменьшения переходного сопротивления контакта и в некоторых случаях, как показывает опыт, может оказаться даже вредной. У нас все же нет никаких оснований полагать, что в существующих конструкциях штепсельных устройств типа ШВ-9677 увеличение переходного сопротивления контакта идет за счет пришлифовки контактных поверхностей с ростом числа включений, так как, во-первых, если структура контактных поверхностей с ростом числа включений и сглаживается, то этот процесс сглаживания имеет очень мало общего с полировкой или шлифовкой, и, во-вторых, если бы даже это

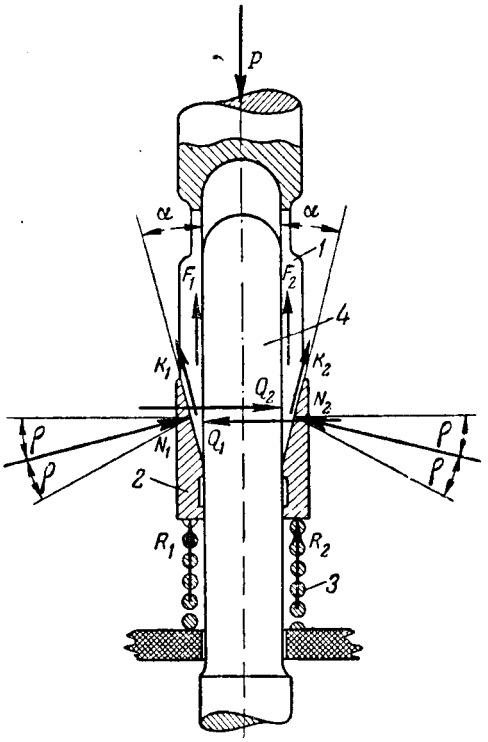

Рис. 2. Схема контактного соединения штепселя ШВ—9677 системы ВУГИ.
1 — разрезное гнездо; 2 — обжимная втулка; 3 — пружина сжатия; 4 — контактный палец.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

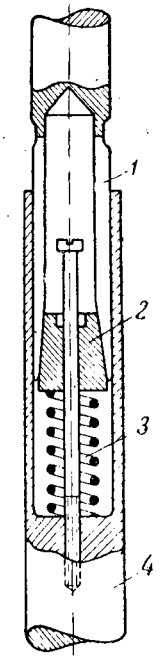

Рис. 3. Схема контактного соединения штепселя ШВ-9678-ВК.

1 — разрезное гнездо; *2* — конус; *3* — пружина сжатия; *4* — гильза.

и имело место, то для получения полированных поверхностей, имеющих первоначальную обработку $\nabla\nabla$, потребовалась бы не одна тысяча включений, в то время как в существующих штепсельных устройствах уже после 500 включений наблюдается значительный перегрев против первоначального. И, наконец, результат испытаний штепселя системы ВУГИ (см. ниже) показывает, что процесс повторных включений и выключений благоприятным образом сказывается на температурном режиме аппарата.

На основании изучения причин аварий существующих штепсельных устройств автором была предложена новая конструкция розеточного штепселя, в которой использована идея клинового соединения, находящегося под действием спиральной цилиндрической пружины сжатия.

Как видно из схемы рис. 2, при включении штепселя сегменты гнезда *1*, имеющие на конце внешнюю коническую обработку, входят в обжимную втулку *2* с внутренней конической обработкой. После соприкосновения сегментов с обжимной втулкой процесс включения будет сопровождаться сжатием пружины *3*, реакция которой через обжимную втулку передается на сегменты и вызовет их прижатие к контактному пальцу *4*.

Опытный образец штепселя системы ВУГИ выполнен в габаритах существующего штепселя ШВ-9677 на номинальный ток 120 *а*.

Сравнительные испытания на нагрев штепселя новой системы и ШВ-9677 дали следующие результаты. При токе 120 *а* оба штепселя без изоляционных цилиндров на открытом воздухе при установившемся тепловом режиме имели следующий перегрев контактной системы: ВУГИ — 20° С, ШВ-9677 — 19,5° С. После тысячи повторных включений при тех же условиях перегрев контактной системы имел следующие значения: ВУГИ — 17° С, ШВ-9677 — 29° С. Следовательно, относительный перегрев штепселя ШВ-9677 против штепселя новой системы после тысячи включений увеличился на 12° С.

Полученные на частном примере температуры перегревов штепсельных устройств обеих систем, вообще говоря, могут иметь и другие значения. Ценность проведенного опыта заключается в том, что в штепселе системы ВУГИ сам процесс повторного включения улучшает качество контакта, а в штепселе ШВ-9677 — ухудшает.

По образцу штепселя системы ВУГИ Кемеровским электромеханическим заводом была разработана несколько иная конструкция штепселя типа ШВ-9677 [ВУГИ], типовые испытания которого (по данным заводской лаборатории) дали перегрев контактной системы, превышающий допустимый.

Усматривая причину перегрева штепселя за счет дополнительного нагрева охватывающих токопроводящую систему деталей (обжимная втулка, упорное кольцо, пружина), в которых по предположению наводятся э. д. с. индукции, а следовательно, и вихревые токи, заводом было принято решение убрать все вспомогательные детали контакта внутрь токоведущей системы. Результатом этого предположения было появление нового образца штепселя этой же системы ШВ-9678 [— ВК] (рис. 3), принятого в настоящее время к промышленному внедрению. Как видно из схемы, в штепселе ШВ-9678 ВК использована та же самая идея клинового соединения, находящегося под действием цилиндрической пружины сжатия, но конструкция аппарата стала значительно сложнее.

Как уже указывалось выше, предположение о возникновении вихревых индуктивных токов в деталях, охватывающих токопроводящую систему, несостоятельно и не может явиться основанием для объяснения дополнительного перегрева штепселя типа ШВ-9677 [ВУГИ]. Следовательно, причина перегрева штепселя, наблюдаемая в заводской лаборатории, имеет совершенно другое происхождение. По нашему мнению, перегрев штепселя ШВ-9677 [ВУГИ], наблюдаемый в заводской лаборатории, связан с гистерезисными потерями в стальных деталях, материал которых был выбран случайно. Сталь, выбранная для изготовления этих деталей, представляет магнитопроводящую систему, поэтому естественно предположить, что гистерезисные потери способствовали некоторому повышению температуры штепселя (витки пружины, имеющие воздушные зазоры при малом диаметре проволоки, в расчет можно не принимать).

Замена стали любым немагнитным материалом для изготовления обжимных втулок и упорных колец, очевидно, исключит возможность дополнительного перегрева штепселя за счет гистерезисных потерь, а потому изменение конструкции штепселя ШВ-9677 [ВУГИ] ничем не обосновано.

С некоторыми оговорками можно допустить, что в деталях, охватывающих гнездо и палец, возможно возникновение вихревых токов. Однако, как показывает опыт, дополнительный нагрев штепселя вихревыми токами настолько незначителен, что практически не имеет никакого значения. Опыты, проведенные в лаборатории горного электрооборудования ВУГИ, показали, что перегрев деталей вихревыми токами не превышает 0,5° С, т. е. перегрев в пределах ошибки измерения.

Таким образом, без нужды усложненная конструкция штепселя типа ШВ-9678 ВК ничем не оправдана, а доводы лаборатории Кемеровского электромеханического завода в этом вопросе нельзя считать основательными.

[6. 1. 1950]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Масляные селеновые выпрямители

Инж. И. И. РАТГАУЗ

Завод МПСС

Описываются отечественные конструкции мощных масляных селеновых выпрямителей. Приводятся некоторые данные по их внедрению и эксплоатации.

В период 1947—1950 гг. было спроектировано несколько конструкций масляных твердых выпрямителей при руководящем участии автора. В настоящее время накопился некоторый опыт их производства и эксплоатации. Весьма большое количество масляных выпрямительных устройств находится в эксплоатации до двух и более лет.

Первый селеновый выпрямитель масляной конструкции промышленного типа был разработан автором в 1947 г. (для предложенной тогда схемы ДАГ). Выпрямитель предназначался для питания роторов синхронизуемых, в целях повышения $\cos\varphi$, асинхронных двигателей. В нем были предусмотрены два основных соединения. При соединении выпрямителя для работы по трехфазной однополупериодной схеме выпрямления его номинальный выпрямленный ток составляет 600 *а* при выпрямленном напряжении около 9 *в*. Путем переключения для работы по трехфазной мостовой схеме (по схеме А. Н. Ларионова) можно получить выпрямленное напряжение около 18 *в* при токе 325 *а*. В процессе освоения выпрямитель подвергался известной корректировке.

В октябре 1948 г. были сданы в пробную эксплоатацию два образца шахтного автоматического зарядного устройства на выпрямленную мощность около 12,5 *квт*, разработанного на заводе МПСС [Л. 3]. Вес этого устройства, включая масло и кожух, более 1 *т*. Образцы работают круглосуточно при номинальной нагрузке без смены выпрямительного блока — один около двух лет, а другой около полутора лет. В образцах применены выпрямительные элементы на стальной основе диаметром 100 *мм*. Нагрузка на элемент составляет около 9 *а* выпрямленного тока — шестикратная номинальному току в схеме однофазного однополупериодного выпрямления и двухкратная по сравнению с номинальным током, пересчитанным к схеме Ларионова. Выпрямитель осуществляет заряд по двухступенчатому режиму. Средний к. п. д. устройства за цикл заряда выше 70%. В шахтах сейчас установлены много выпрямителей этой конструкции, приспособленные для заряда щелочных батарей, емкостью 500 *ач*. В них применены элементы на алюминиевой основе с нанесением селена в вакууме.

В начале 1944 г. автор совместно с Л. Н. Афанасьевым и В. А. Белоусом (трест «Энергоуголь» Министерства угольной промышленности) по разработанной автором и В. А. Белоусом упрощенной схеме автоматического заряда по двухступенчатому режиму разработали управляемое дросселями насыщения масляное выпрямительное устройство, типа ВСЗШ-50/40. Устройство предназначено для заряда кислотных аккумуляторных батарей двухтонных рудничных электровозов типа АК-2. Номинальный ток первой ступени заряда 50 *а*, второй ступени 16 *а*.

Два опытных образца этого устройства работают в шахте с мая 1949 г. в номинальном режиме приблизительно 16 *час* в сутки. Сейчас в шахтах установлено весьма большое количество таких устройств. Наконец, в начале 1949 г. по инициативе главного энергетика МУП К. И. Скоркина были разработаны автором (трест «Энергоуголь») совместно с Л. Н. Афанасьевым еще два типа масляных выпрямителей для синхронизации асинхронных двигателей. Эти два выпрямителя совместно с устройством, разработанным в 1947 г. и подвергшимся модернизации, образовали небольшую серию: ВСМН-1000/525; ВСМН-800/420; СВТМ-600-8. Номинальный ток при трехфазной схеме со средней точкой выпрямления первого из названных типов составляет 1 000 *а*, второго — 800, третьего 600 *а*. Соответственно в трехфазной мостовой схеме — 525 *а*, 420 и 325 *а*. Номинальная типовая мощность выпрямителей 10, 8 и 6 *квт*.

В выпрямителях осуществлена ступенчатая регулировка выходного напряжения (таблица) посредством системы грубой и тонкой регулировки в первичной обмотке трансформатора. При соединении выпрямителя по трехфазной схеме со средней точкой выпрямления выпрямленное напряжение можно изменять через 6—7%, от 9,1 до 5,9 *в*. При переключении выпрямителя для работы по трехфазной мостовой схеме напряжение можно изменять такими же ступенями от 18,6 до 12 *в*. Ступенчатая регулировка осущест-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Регулировка выпрямленного напряжения выпрямителей серии ВСМН

Переменное напряжение на входе выпрямительного блока, *в*	Трехфазная схема со средней точкой		Схема Ларионова	
	Выпрямленное напряжение, *в*	Выпрямленное напряжение, %	Выпрямленное напряжение, *в*	Выпрямленное напряжение, %
17,3	9,1	—	18,6	—
16,3	8,4	93	17,3	93
15,3	7,8	93	16	93
14,5	7,3	94	14,9	93
13,7	6,8	93	13,9	93
13,0	6,3	93	12,9	93
12,3	5,9	94	12,0	93

вляется путем переключений на крышке бака. Для перехода от трехфазной схемы со средней точкой выпрямления к трехфазной мостовой схеме следует поднять выемную часть и осуществить переключения выпрямительного блока.

Производственное освоение масляных выпрямителей осуществлено Днепропетровским заводом (инж. И. Д. Пшенишний) Министерства угольной промышленности и заводом КИП Министерства нефтяной промышленности (инж. Б. А. Сошальский), которые и внедряют эти новые аппараты. Завод КИП выпустил весьма крупную серию выпрямителей. Днепропетровский завод Министерства угольной промышленности выпускает выпрямители типа ВСМН, зарядные устройства ВСЗШ-1 и ВСЗШ-50/40.

Конструкция. Масляные конструкции выпрямителей обладают несколькими весьма большими достоинствами по сравнению с сухими конструкциями естественного и форсированного воздушного охлаждения.

Не подлежит сомнению сравнительно высокая стойкость масляных устройств в отношении агрессивных газов, проводящей пыли, в частности угольной, к атмосфере с повышенным содержанием влаги или содержащей пары кислот. Попытки применения сухих конструкций в шахтах пока себя не оправдали. Масляные конструкции стойки в отношении сравнительно длительных перегрузок. Часто считают, что селеновые выпрямители допускают большие перегрузки. Это не совсем верно. Выпрямительные элементы могут работать в режимах кратковременных нагрузок с нагрузкой на элемент, намного превосходящей номинальную (в десять и даже более раз), если эта нагрузка и длительность работы выбраны так, что нагрев элементов к концу режима работы не превосходит заметно допускаемой температуры. Но гибельным для конструкции является заблуждение,— которое можно встретить и в литературе,— что полупроводниковый выпрямитель, надлежащим образом использованный в термическом отношении и достигший в процессе работы своей установившейся температуры, можно существенно перегружать даже на время, исчисляемое минутами. Следует всегда учитывать, что постоянная времени выпрямительного элемента весьма невелика. Например, выпрямительный элемент диаметром 100 *мм* имеет постоянную времени [Л. 1] около 7 *мин* (температура практически устанавливается за 20 *мин*). Ясно, что при такой малой постоянной времени нельзя заметно перегрузить элемент, достигший установившейся предельно допускаемой температуры в результате работы под номинальной нагрузкой. Нам известен случай массового выхода из строя сухих выпрямителей в результате имевших место по условиям работы частых коротких замыканий. После погружения этих выпрямителей в масло аварии прекратились.

При масляной конструкции перегрев элементов над маслом составляет несколько градусов. Постоянное время масляной ванны велико. Очевидно, что масляный выпрямитель должен быть стоек к большим и сравнительно длительным перегрузкам. Масляные выпрямители обладают высокой стойкостью в отношении обратных напряжений [Л. 4]. Масляные конструкции естественного охлаждения обладают еще одним достоинством по сравнению с конструкциями с форсированным воздушным охлаждением — бесшумность в работе, достоинство, весьма ценное при установке нескольких выпрямительных устройств в одном помещении, например в гараже. Они также просты в уходе.

К маслу, применяемому для селеновых выпрямителей, не предъявляют особых требований. В основном оно должно быть сухое и иметь низкое кислотное число (не более 0,05 *мг* КОН/*г*).

Но масляные конструкции имеют свои отрицательные стороны, вследствие чего в диапазоне мощных конструкций в ряде областей применения их вытесняют полупроводниковые выпрямители с форсированным воздушным охлаждением. Этими недостатками являются габариты и вес в случае мощных устройств. Объясняется это двумя обстоятельствами. Коэффициент полезного действия селенового выпрямителя мал по сравнению с к. п. д., например, трансформатора такой же типовой мощности. Если трансформатор мощностью 10 *ква* имеет к. п. д. порядка 95%, то к. п. д. полупроводникового выпрямителя такой же мощности в редких случаях превосходит 85%. В то же время перегрев масла над окружающей средой в трансформаторе составляет порядка 45° С, а перегрев масла выпрямителя равен приблизительно 20 ÷ 25° С при окружающей температуре 35° С. Можно сейчас прийти к выводу, что десятикиловаттный выпрямитель требует по условиям нагрева кожух с той же поверхностью охлаждения, что и трансформатор порядка 100 *ква*.

Весьма перспективно применение масляных конструкций с форсированным охлаждением масла проточной водой для гальванических устройств. Такие устройства имеют сравнительно весьма малый габарит, к. п. д. процесса выпрямления — высокий, так как отходящая подогретая вода используется в технологическом процессе.

Все перечисленные выше типы выпрямителей в основном конструктивно оформлены одинаково. Например, в выпрямительном блоке выпрямителя ВСЗШ-50/40 (рис. 1) элементы расположены на радиаторах-платах, что нами сде-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

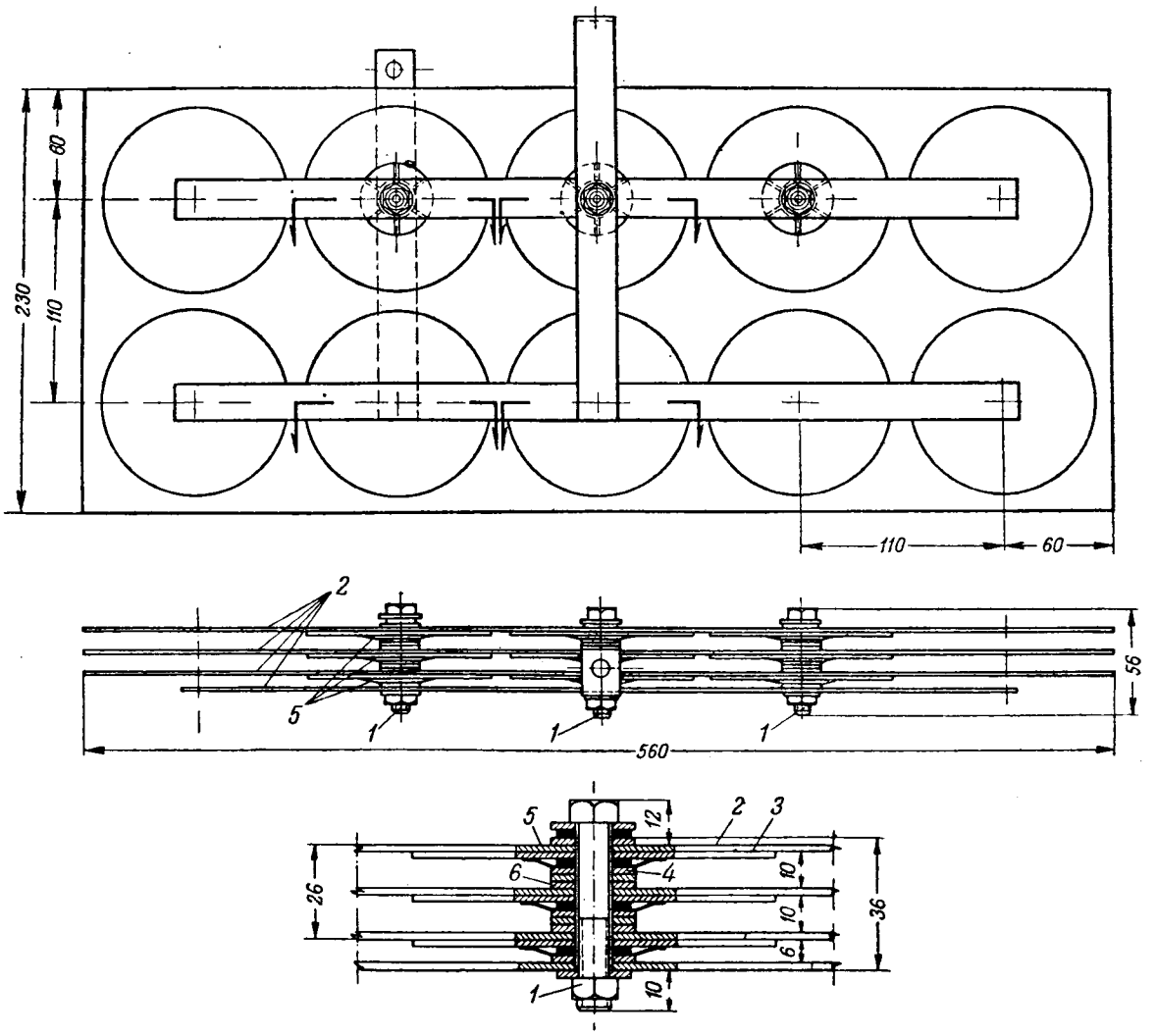

Рис. 1. Эскиз выпрямительного блока автоматического зарядного устройства ВСЗШ-50/40 в масляном исполнении.

лано с целью понижения перегрева элементов над маслом и для выравнивания в известной мере температуры элементов. Радиаторы выполняются из дюралюминия. При сборке следует обращать внимание на надлежащее прилегание элементов к платам. Каждые три радиатора образуют пакет. Таких пакетов в выпрямителе шесть, по числу плеч трехфазной мостовой схемы. Сборка пакетов производится совершенно так же, как собираются хорошо известные выпрямительные столбики. На сборные шпильки *1* надеваются радиаторы *2*, затем выпрямительные элементы *3*, изоляционные шайбы *4*, контактные звездочки *5* и дистанцирующие шайбы *6*, снова радиатор и т. д. Для контактных звездочек нами введено лужение. Пакеты устанавливаются в пазы деревянных брусьев. Стяжка выпрямительного блока осуществляется шпильками и крепежом.

При более высоком числе элементов на плате сборку, подобную сборке столбиков, неудобно осуществлять. Это рискованно,— нет уверенности в надежном контакте выпрямительных элементов с платой и к тому же громоздко. В этом случае контактная звездочка каждого элемента крепится самостоятельно к плате болтом.

На фотоснимке рис. 2 показана выемная часть выпрямителя типа ВСМН в процессе сборки выпрямителя.

Опыт эксплоатации. Основная масса выпущенных масляных выпрямителей выполнена с элементами на алюминиевой основе. Коэффициент полезного действия выпрямителей типа ВСМН, выполненных на алюминиевых элементах, лежит в пределах 75÷85%. Выпрямители с элементами на стальной основе этого же типа имеют к. п. д. порядка 0,71÷0,75. Кривая к. п. д. селенового выпрямителя в отличие от кривой к. п. д. электрических машин и элементов трансформаторов имеет весьма пологий ход. При надлежащем качестве элементов и в пределах от 25 до 125% номинальной нагрузки к. п. д. практически остается неизменным. Это объясняется тем, что вольтамперная характеристика качественных элементов имеет весьма крутой ход, так что падение напряжения на элементе сравнительно мало зависит от нагрузки. Поэтому потери в выпрямителе пропорциональны нагрузке в степени

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

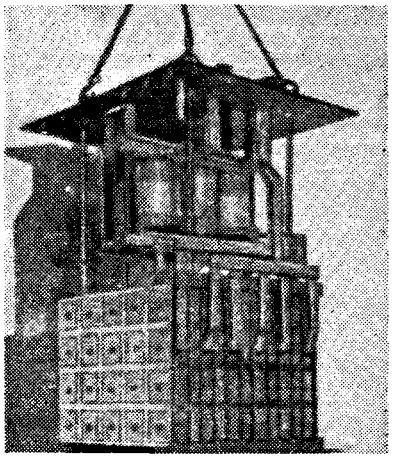

Рис. 2. Выемная часть масляного селенового выпрямителя в процессе сборки. (Днепропетровский завод Министерства угольной промышленности, завод КИП Министерства нефтяной промышленности).

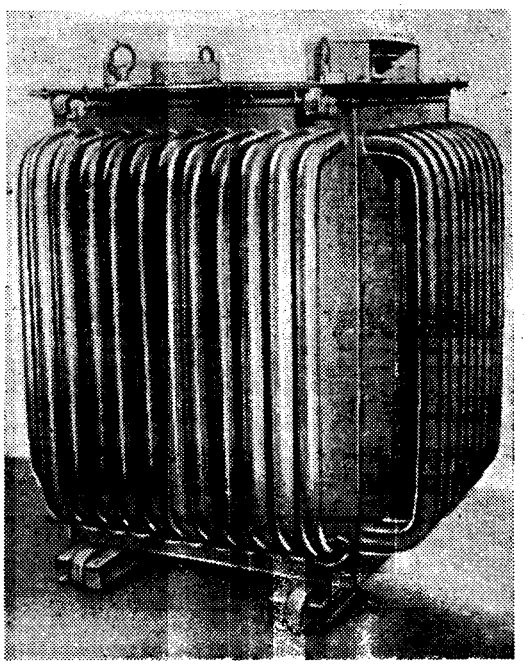

Рис. 3. Масляный селеновый выпрямитель типа ВСМН (Днепропетровский завод Министерства угольной промышленности, завод КИП Министерства нефтяной промышленности).

1,3÷1,25 (а не 2, как в машинах) и к. п. д. практически мало изменяется в широком диапазоне изменения нагрузки. Выходное напряжение выпрямителей, собранных на стальной основе, снижается несколько после первого периода эксплоатации (1 000÷1 500 *час*). Наблюдается некоторое снижение к. п. д., увеличение температуры выпрямителей. При элементах на алюминиевой основе эти явления в заметной степени не наблюдаются. Это вовсе не значит, что элементы на алюминиевой основе не подвержены старению. Но эти элементы не имеют участка с крутым ходом в начале кривой старения (в начале эксплоатации), как выпрямительные элементы на стальной основе.

Среди прочих опасений, связанных с применением селеновых выпрямителей, встречается странный предрассудок, что эти выпрямители имеют низкий $\cos\varphi$. Следует отметить, что полупроводниковые выпрямители имеют тот же $\cos\varphi$, что и другие виды электронно-ионных выпрямителей [Л. 2].

Расчеты выпрямительных блоков описанных конструкций велись по методу, предложенному В. Г. Комаром [Л. 1].

Литература

1. В. Г. Комар. Расчет твердых выпрямителей. Электричество, № 9, 1946.
2. И. Л. Каганов. Электронно-ионные преобразователи. Госэнергоиздат, 1941.
3. И. И. Ратгауз и В. А. Белоус. Автоматические зарядные устройства. Электричество, № 12, 1949.
4. E. Richards, JIEE, May 1942.

[8. 4. 1950]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

К вопросу существования инверсии электрических разрядов в установках с вибрирующими контактами

Кандидат техн. наук, доц. М. Ф. КАРАСЕВ, инж. В. А. ФАЛЕЕВ и инж. В. П. УБЕЕВ

Томский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта

В свете экспериментальных данных рассматривается в несколько новом аспекте теория инверсии электрических разрядов Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. В частности, рассматривая процессы в области, пограничной с кривой возникновения дуги, авторы приходят к практически ценному выводу о неправильности гашения дуги чрезмерно большими емкостями, которые полностью снимают электрический разряд, сопровождающий процесс размыкания цепи. Это приводит к уменьшению срока службы контактной системы.

В работе Б. Р. и Н. И. Лазаренко [Л. 1] по электроискровой обработке металлов указывается, что для вибрирующих контактов, параллельно которым подключена емкость (рис. 1), существует инверсия электрических разрядов.

Согласно заключению авторов, две области электрических разрядов (рис. 2) — искрового и дугового — разделены между собой границей инверсии, которая характеризуется отсутствием электрической эрозии электродов. Удаление от границы инверсии в области дугового разряда сопровождается непрерывным увеличением количества материала, переносимого в единицу времени с катода на анод, и заканчивается образованием стабильного дугового разряда. Удаление же от границы инверсии в искровую область сопровождается непрерывным увеличением эрозии анода.

Величина и направление электрической эрозии определяется главным образом следующими факторами: 1) составом материала, из которого изготовлены электроды, 2) составом и состоянием среды, в которой работают электроды и 3) соотношением электрических параметров схемы, в которой находятся электроды, разрывающие цепь.

Для того, чтобы выяснить сущность происходящих явлений в установках с вибрирующими контактами, нами были поставлены опыты, результаты которых дают основания сделать выводы относительно кривой «инверсии» в несколько ином виде, нежели это дано в работах указанных авторов. Кривая, как это подтвердили опыты, есть не что иное, как пограничная область возникновения электрической дуги.

Для электрической дуги, как известно, существует вольтамперная характеристика, очертание которой изображено на рис. 3. Из графика видно, что для каждого напряжения существует минимальный ток, точно так же, как для каждого тока существует минимальное напряжение, при уменьшении которого дуга невозможна. Если же последовательно в цепь вибрирующих контактов включается индуктивность, то в этом случае для каждого значения тока напряжение питающего источника будет ниже на величину э. д. с. самоиндукции, возникающей при размыкании тока. Таким образом, и в этом случае то положение, что для каждого значения тока существует вполне определенное напряжение образования электрической дуги, остается в силе.

Различным же материалам вибрирующих контактов соответствуют различные кривые, характер очертания которых один и тот же.

Опыт на установке с вибрирующими контактами производился по схеме рис. 1 с подключен-

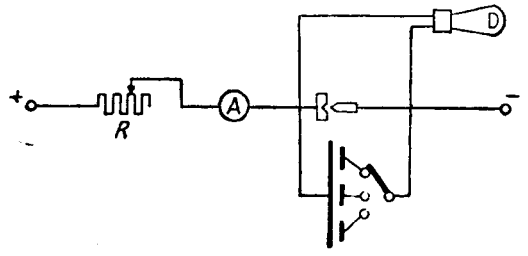

Рис. 1.

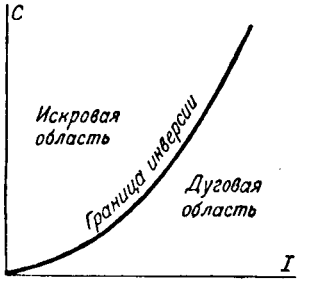

Рис. 2.

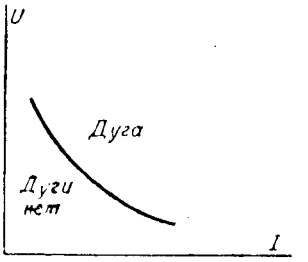

Рис. 3.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

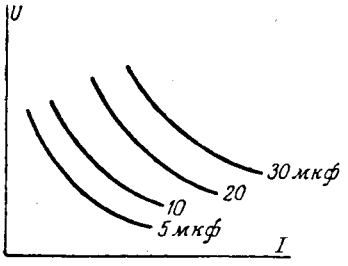

Рис. 4.

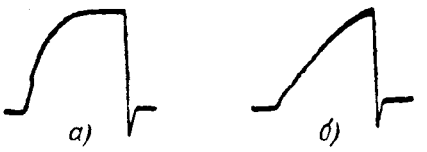

Рис. 5.

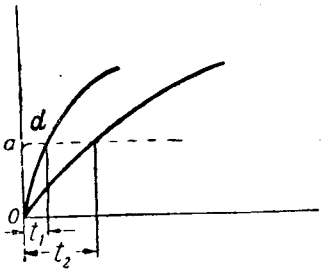

Рис. 6.

ным параллельно контактам катодным осциллографом. Момент образования дуги отмечался по появлению светящегося пятна в кривой падения напряжения между контактами, фиксируемой осциллографом.

На рис. 4 представлены полученные из опыта вольтамперные характеристики дуги при различных емкостях, включенных параллельно вибрирующим контактам. Как видно, для неизменного напряжения, питающего установку, значения тока, при которых происходят образования электрических дуг, тем выше, чем больше подключенная емкость.

Такое поведение емкости в данной схеме становится совершенно понятным, если взглянуть на осциллограммы напряжения между контактами (рис. 5). Из осциллограмм видно, что скорость нарастания напряжения между контактами в момент расхождения их будет тем меньше, чем больше подключенная емкость. Следовательно, если отрезок *od* (рис. 6) представляет минимальное напряжение электрической дуги, то при меньшей емкости это напряжение на контактах установится через время t_1, а при большей — через t_2. Большему времени для установления необходимого напряжения соответствует и большее расстояние между электродами. Таким образом, увеличение тока, необходимого для образования дуги при увеличении емкости (рис. 1), происходит вследствие уменьшения скорости нарастания напряжения при расхождении контактов, связанного с зарядом конденсатора.

Если, пользуясь вольтамперными характеристиками дуги, полученными при различных емкостях (рис. 4), построить кривую возникновения электрической дуги в координатах U и I при постоянном напряжении питающего источника тока, то в этом случае мы и получим названную указанными авторами кривую «инверсии» электрических разрядов. На рис. 7 приведена подобная кривая для напряжения источника тока $U = 60$ *в*. Эта кривая не имеет никакого отношения к искре, происходящей в момент замыкания контактов, а фиксирует лишь пограничную зону возникновения электрической дуги при размыкании контактов, и все точки этой кривой соответствуют вольтамперным характеристикам дуги (рис. 4). Отрезок, отсекаемый кривой на оси абсцисс, представляет минимальный ток возникновения дуги при отсутствии емкости. Одновременное существование искры при замыкании контактов и дуги при их размыкании подтверждается опытом.

Интенсивность искры зависит, с одной стороны, от напряжения источника тока, а с другой, — от величины емкости, включенной параллельно контактом. При искровом разряде, который завершается в чрезвычайно короткое время, реализуется энергия электрического поля конденсатора $A = \frac{C \cdot U^2}{2}$, благодаря чему интенсивность искры находится в прямой зависимости от энергии этого поля.

Таким образом, мы видим, что искра всегда сопутствует включению контактов. Если напряжение мало, то необходимые высокие градиенты потенциала для пробоя пространства между электродами будут иметь место при очень близком расстоянии между электродами, благодаря чему и чрезвычайно слабую искру при данных условиях не представится возможным видеть.

Вне всякого сомнения, должна существовать пограничная область, характеризуемая тем, что при одновременном существовании дуги и искры количества материала, переносимого в единицу времени дугой и искрой, равны между собой. Эта пограничная область расположится вправо от кривой возникновения дуги (рис. 8) и, следовательно, на основе этой кривой необходимо признать ошибочным общепринятый способ дугогашения подключением емкости такой величины, что полностью снимается электрический разряд, сопровождающий процесс размыкания цепи. Это приводит к уменьшению срока службы контактной системы.

В щеточном контакте электрических машин постоянного тока также, как правило, имеют место дуговые и искровые разряды, сопровождающие момент замыкания и размыкания коммутируемых секций. Здесь вопрос о наименьшем электрическом износе щеток и коллектора должен решаться главным образом путем соответ-

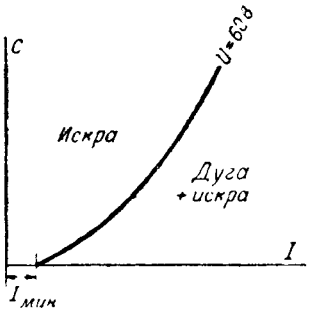

Рис. 7

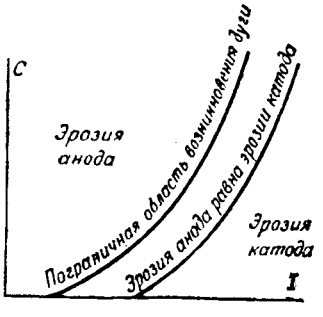

Рис. 8

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ствующего подбора материала контактных элементов, щетки и коллектора.

Благоприятная вольтамперная характеристика дуги контакта щетка—коллектор является основным условием хорошей работы щеточного контакта. Именно поэтому пара контактных материалов медь—графит обеспечивает в ответственных случаях наилучшие условия работы коллектора и щеток. В свете такого представления работы щетки на коллекторе должны иметь большое значение также и интенсивность охлаждения щеточного контакта. Поэтому данному вопросу следует уделить соответствующее внимание при конструировании коллекторных машин.

Выводы. 1. В установках с вибрирующими контактами не существует инверсии электрических разрядов, так как эти разряды разграничены по времени (искра возникает в момент замыкания контактов, а дуга в момент их размыкания).

2. Увеличение емкости, приключаемой параллельно контактам, приводит, с одной стороны, к замедлению нарастания напряжения на контактах в момент их размыкания (ограничивает интенсивность электрической дуги), а с другой стороны, увеличивает интенсивность искры при замыкании контактов, благодаря чему и наблюдается как бы превращение дуги в искру.

3. В координатах C и I можно отметить две характерные пограничные области. Одна соответствует начальной стадии возникновения дуги, вторая характеризуется тем, что при наличии дуги и искры количества переносимого материала в том и другом направлении одинаковы. Следовательно, работа контактной системы в этой области обеспечит минимальный электрический износ контактов.

Литература

1. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Электрическая эрозия металлов. Госэнергоиздат, 1944.

[12. 4. 1950]

◇ ◇ ◇

Метод холостого хода и короткого замыкания в применении к графическому исследованию трехфазных цепей

Кандидат техн. наук **Э. И. РАСОВСКИЙ**
МИМЭСХ

Рассматривается применение метода холостого хода и короткого замыкания для графического исследования трехфазных цепей, составным элементом которого является прием разделения общего напряжения между двумя последовательными участками цепи. Приводится аналитическое выражение и графический прием для определения местоположения нейтрали в трехфазной системе. В качестве иллюстрации рассматривается случай замыкания на землю одной из фаз трехфазной линии электропередачи при наличии дугогасящей катушки.

Графический метод исследования цепей переменного тока удобен не только для иллюстрации рассматриваемых явлений, но и для расчетов, особенно в тех случаях, когда вычисления с комплексными величинами оказываются громоздкими.

Графическое исследование однофазных и трехфазных систем в ряде случаев чрезвычайно упрощается, если воспользоваться методом холостого хода и короткого замыкания [Л. 1].

1. Составным элементом предлагаемого графического метода является прием разделения общего напряжения между двумя последовательными участками однофазной цепи (рис. 1,*а*). Это напряжение, как известно, равно геометрической сумме частичных напряжений (рис. 1, 2): $\dot{U}_{AB}=\dot{U}_{AD}+\dot{U}_{DB}$.

Если комплексы сопротивлений участков будут

$$Z_A=z_A e^{j\varphi_A}=\frac{1}{Y_A} \quad \text{и} \quad Z_B=z_B e^{j\varphi_B}=\frac{1}{Y_B},$$

то напряжения отдельных участков относятся между собою прямо пропорционально их сопротивлениям:

$$\frac{\dot{U}_{AD}}{\dot{U}_{DB}}=\frac{Z_A}{Z_B}=\frac{Y_B}{Y_A}. \quad (1)$$

В частном случае однородных сопротивлений ($\varphi_A=\varphi_B$) точка D будет лежать на прямой AB (точка d рис. 1,*б*), деля ее на части, пропорциональные величине соответствующих сопротивлений:

$$\frac{U_{Ad}}{U_{dB}}=\frac{z_A}{z_B}.$$

В этом случае общее напряжение будет уже равно арифметической сумме отдельных напряжений:

$$U_{AB}=U_{Aa}+U_{dB}.$$

Так как

$$\frac{AD}{DB}=\frac{Ad}{dB}=\frac{z_A}{z_B},$$

то точка D должна, очевидно, лежать на биссектрисе угла δ при вершине треугольника ADB (рис. 1,*б*) поскольку эта биссектриса делит осно-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

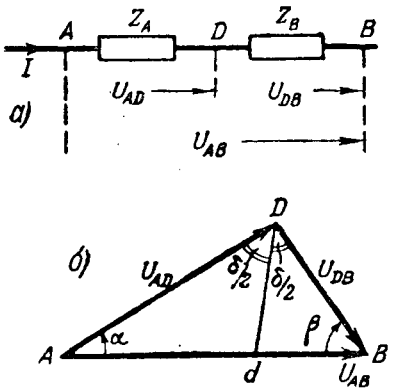

Рис. 1. Два последовательных участка. *а*—схема; *б*—векторная диаграмма напряжений.

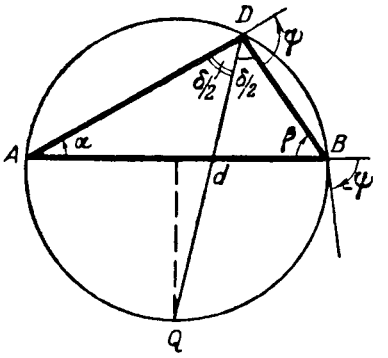

Рис. 2. Проведение биссектрисы угла δ через точку *d*.

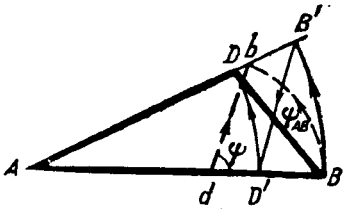

Рис. 3. Построение треугольника напряжений.

вание AA на части, пропорциональные прилегающим сторонам.

Обозначим угол между векторами $\dot{U}_{AD}$ и U_{DB}, равный $\varphi_A - \varphi_B$, через ψ_{AB}. Этот угол равен также разности углов α и β (с учетом их знака) при основании треугольника (рис. 1, 2):

$$\psi_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = \alpha - \beta.$$

При изменении величины одного из сопротивлений цепи, например Z_B, но при сохранении неизменным аргумента ($\varphi_B = \text{const}$, $\psi_{AB} = \text{const}$), вершина D треугольника напряжений будет, очевидно, перемещаться по дуге окружности, построенной на прямой AB, как на хорде, и с углом ψ_{AB} между продолжением этой хорды и касательной BT (рис. 2).

Отсюда — простой графический прием нахождения точки D. Вектор AB делят в заданном отношении z_A к z_B и получают точку d. Затем проводят окружность по хорде AB и углу ψ_{AB} между продолжением этой хорды и касательной (рис. 2). Из конца Q диаметра, перпендикулярного хорде AB, проводим прямую Qd, продолжение которой пересекает дугу AB в точке D. Действительно, углы ADQ и BDQ равны, как опирающиеся на одинаковые дуги. Следовательно, линия QD является биссектрисой угла δ.

Можно предложить другой, более экономный, графический прием построения треугольника ADB. Как и в предыдущем случае, вектор AB делят на части, пропорциональные z_A и z_B, и получают точку d. Затем поворачивают отрезок dB на угол ψ_{AB} (рис. 3) и через полученную точку b проводят из A вспомогательную прямую AB'. На этой прямой радиусом AB отсекают точку B', из которой проводят линию $B'D'$, параллельную bd, после чего радиусом AD' отсекают на той же прямой AB точку D, которую соединяют с B (рис. 3).

М. А. Перекалин [Л. 2] предложил весьма удобный прием построения треугольника напряжений, сущность которого сводится к построению вспомогательного треугольника сопротивлений, подобного этому треугольнику напряжений (рис. 4).

Если заданный отрезок AB принять за единицу, то проведенный к нему под углом ψ_{AB} отрезок BM выразит сопротивление z_B в относительных единицах:

$$\frac{BM}{AB} = \frac{z_B}{z_A} \quad \text{или} \quad BM = AB\frac{z_B}{z_A}.$$

Если затем (рис. 4) точку M соединить с A, а под углом β, образованным у вершины M, провести из B прямую, то на пересечении ее с линией AM мы и получим точку D.

Вместо треугольника сопротивлений можно конечно, строить подобный треугольник проводимостей, как это показано пунктиром на рис 4.

Указанный прием особенно удобен при непрерывном изменении одного из сопротивлений цепи, например, при построении круговых диаграмм, давая возможность следить за перемещением, точки D. Следует, однако, отметить, что этот прием дает значительную ошибку при малых углах ψ_{AB} и, следовательно, при малых β. В случае же одинакового характера сопротивлений Z_A и Z_B ($\psi_{AB} = 0$) этот прием вовсе неприменим и должен быть заменен другим графическим приемом [Л. 2, стр. 60].

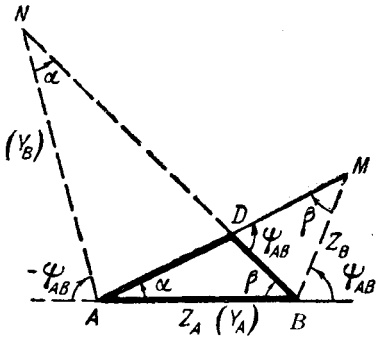

Рис. 4. Подобные треугольники напряжений и сопротивлений (проводимостей).

2. Обратимся теперь к применению метода холостого хода и короткого замыкания в сочетании с изложенным выше графическим приемом к исследованию трехфазных систем.

Рассмотрим общий случай трехпроводной системы (рис. 5). При обрыве фазы A (рис. 5,*а* режим холостого хода) нейтраль N на векторной

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

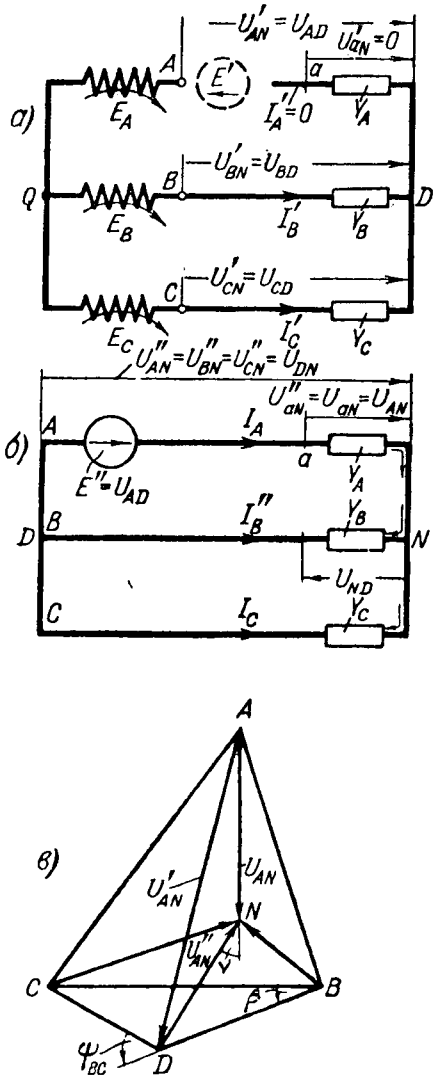

Рис. 5. Наложение режимов холостого хода и короткого замыкания в трехфазной системе.

а — режим холостого хода; *б* — режим короткого замыкания: $E_A=E_B=E_C=E'=0$; *в* — векторная диаграмма.

диаграмме совпадает с точкой D (рис. 5,*в*), положение которой для однофазной цепи BDC определяется по-предыдущему из условия:

$$\frac{\dot U_{BD}}{\dot U_{DC}}=\frac{Z_B}{Z_C}=\frac{Y_C}{Y_B}. \qquad (1')$$

Тем самым определены частичные напряжения и токи для режима холостого хода, которые снабдим одним штрихом.

Фазовые напряжения будут в этом случае:

$$\dot U'_{AN}=\dot U_{AD};\ \dot U'_{BN}=\dot U_{BD};\ \dot U'_{CN}=\dot U_{CD}.$$

Если затем, в соответствии с методом Тевенена, в место разрыва внедрить вспомогательную э. д. с. E'', равную напряжению холостого хода, а все э. д. с. предыдущей схемы закоротить (рис. 5,*б* — режим короткого замыкания), то получим новые частичные напряжения и токи, которые снабдим двумя штрихами.

В этом случае фазовые напряжения будут уже

$$\dot U''_{AN}=\dot U''_{BN}=\dot U''_{CN}=\dot U_{DN}.$$

Очевидно, истинные значения напряжений и токов будут получены в результате наложения режимов холостого хода и короткого замыкания (рис. 5,*в*):

$$\dot U_{AN}=\dot U'_{AN}+\dot U''_{AN}=\dot U_{AD}+\dot U_{DN},$$
$$\dot U_{BN}=\dot U'_{BN}+\dot U''_{BN}=\dot U_{BD}+\dot U_{DN},$$
$$\dot U_{CN}=\dot U'_{CN}+\dot U''_{CN}=\dot U_{CD}+\dot U_{DN}.$$

Из однофазной схемы рис. 5,*б* следует, что напряжения U_{AN} и U_{ND} двух последовательных участков цепи, равные в сумме общему напряжению U_{AD}, относятся между собой обратно пропорционально проводимостям этих участков:

$$\dot U_{AN}+\dot U_{ND}=\dot U_{AD},$$
$$\frac{\dot U_{AN}}{\dot U_{ND}}=\frac{Y_B+Y_C}{Y_A}. \qquad (2)$$

Уравнение (2) позволяет непосредственно находить положение нейтрали N лишь в случае однородных проводимостей в фазах B и C ($\varphi_B=\varphi_C$; $y_{BC}=y_B+y_C$).

Для общего же случая уравнение (2) надо несколько преобразовать, устранив из числителя правой части сумму проводимостей.

Так как

$$\frac{U_{BD}}{\dot U_{BC}}=\frac{\dot U_{BD}}{\dot U_{BD}+\dot U_{DC}}=\frac{Y_C}{Y_B+Y_C},$$

то

$$\frac{\dot U_{AN}}{\dot U_{ND}}=\frac{Y_B+Y_C}{Y_A}\frac{Y_C}{Y_C}=\frac{Y_C}{Y_A}\frac{\dot U_{BC}}{\dot U_{BD}}=\frac{z_A}{z_C}\frac{BC}{BD}e^{j(\psi_{AC}-\beta)}, \qquad (2')$$

т. е. отношение сторон AN и ND треугольника AND равно

$$\frac{AN}{ND}=\frac{z_A}{z_C}\frac{BC}{BD},$$

а угол между ними у вершины N

$$\nu=\psi_{AC}-\beta=\varphi_A-\varphi_C-\beta,$$

здесь β — угол между сторонами BD и BC в треугольнике BDC (рис. 5,*в*).

Таким образом, графическое исследование трехпроводной системы сводится к построению двух треугольников BDC и AND для однофазных цепей согласно уравнениям (1) и (2). Подобным же образом может быть произведено построение диаграммы для четырехпроводной системы.

В качестве примера рассмотрим случай замыкания на землю [Л. 3] одной из фаз трехфазной линии электропередачи, снабженной дугогасящей катушкой (рис. 6).

При режиме холостого хода, т. е. при разрыве места замыкания ($g_A=0$, рис. 6,*а*), напряжения отдельных проводов линии по отношению к земле будут совпадать с соответствующими фазовыми

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

напряжениями источника. Стало быть, нейтраль приемника N совпадает с нейтралью источника Q. Емкостные токи в линии образуют при этом систему прямой последовательности:

$$\dot{I}'_A = j\dot{U}_{AQ} b_C;\ \dot{I}'_B = j\dot{U}_{BQ} b_C = \dot{I}'_a a^2;\ \dot{I}'_C = j\dot{U}_{CQ} b_C = \dot{I}'_A a, \text{ где } a = e^{j120°}.$$

При любом виде замыкания одной из фаз, например фазы A ($g_A > 0$), и при ненастроенной дугогасящей катушке (например, $b_L < 3b_C$) нейтраль системы N окажется на полуокружности ANQ, построенной на векторе AQ, как на диаметре (рис. 6,*в*).

В самом деле, из однофазной схемы для режима короткого замыкания (рис. 6,*б*) следует:

$$\frac{\dot{U}_{AN}}{\dot{U}_{NQ}} = j\frac{3b_C - b_L}{g_A},$$

т. е. вектор AN опережает по фазе вектор NQ на 90°.

Следовательно, если принять отрезок AQ на векторной диаграмме рис. 6,*в* равным проводимости g_A в месте замыкания на землю, а вправо от точки A перпендикулярно AQ отложить в том же масштабе отрезок AF, равный $3b_C - b_L$, то прямая FQ отсечет на указанной окружности точку N.

Можно поступить иначе: отрезок AQ принять равным в некотором масштабе проводимости $3b_C - b_L$, а вправо от точки Q перпендикулярно AQ отложить отрезок QT, равный в новом масштабе величине g_A, тогда прямая TA отсечет на окружности ту же точку N.

Как видно из векторной диаграммы, при отключенной катушке и достаточно малом значении активной проводимости (на рис. 6,*в* $g_A = 3b_C/2$), напряжение поврежденной фазы по отношению к земле U_{AN}, может получить довольно большое значение. Между тем при включении даже ненастроенной катушки это напряжение значительно уменьшается.

Самостоятельный интерес представляет токораспределение в рассматриваемой схеме. Истинные токи будут получены, если на приведенную выше систему токов холостого хода (рис. 6,*а*) наложить токи режима короткого замыкания (рис. 6,*б*).

Из схемы рисунка 6,*б* получаем в емкостях токи нулевой последовательности:

$$\dot{I}''_A = \dot{I}''_B = \dot{I}''_C = j\dot{U}_{QN} b_C.$$

Ток в дугогасящей катушке будет зависеть от степени ее настройки:

$$\dot{I}_L = -j\dot{U}_{NQ} b_L = j\dot{U}_{QN} b_L = 3\dot{I}''_A \frac{b_L}{3b_C}.$$

В то же время ток через место замыкания на землю будет согласно схемы 6,*б*

$$I_g = U_{AQ}\frac{j(3b_C - b_L)g_A}{g_A + j(3b_C - b_L)} = \frac{\dot{U}_{AQ}}{R_A + 1/j(3b_C - b_L)}$$

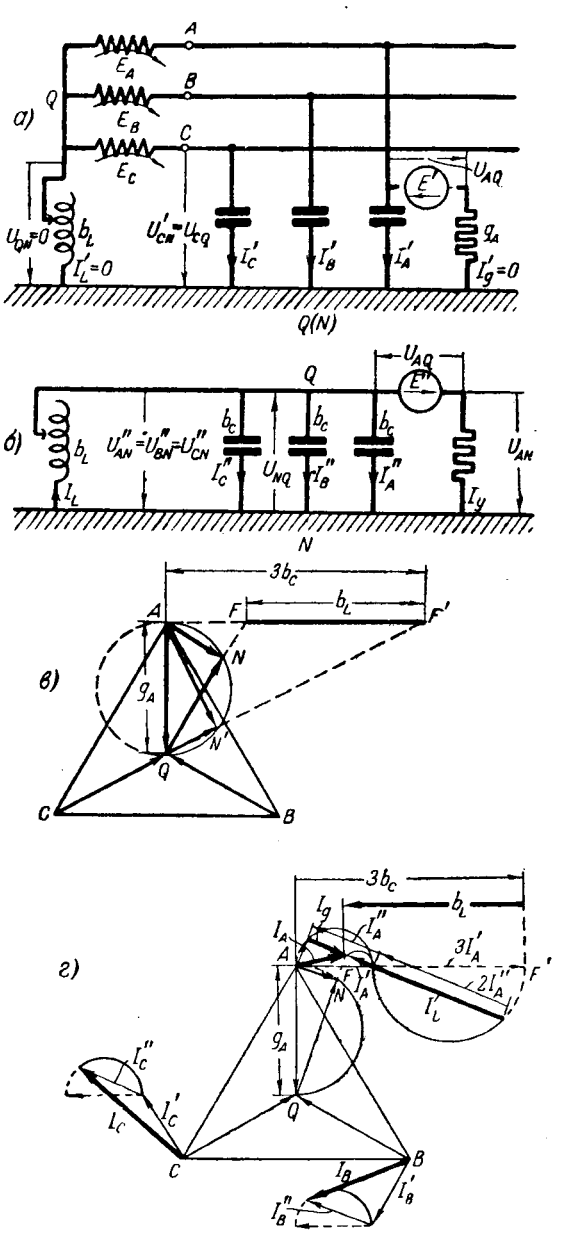

Рис. 6. Замыкание на землю одной из фаз линии электропередачи, снабженной дугогасящей катушкой.

а—режим холостого хода; *б*—режим короткого замыкания; *в*—диаграмма напряжений; *г*—диаграмма токов.

или

$$\dot{I}_g = -3\dot{I}''_A + \dot{I}_L = -3\dot{I}''_A\left(\frac{b_L}{3b_C}\right),$$

т. е. чем больше настроена катушка, тем меньше окажется величина заземляющего тока.

Таким образом, истинные токи в трехфазной линии (до места замыкания) будут в общем случае ненастроенной катушки равны (рис. 6,*г*):

$$\dot{I}_A = \dot{I}'_A + \dot{I}''_A + \dot{I}_g = \dot{I}'_A - 2\dot{I}''_A + \dot{I}_L;$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}'_B + \dot{I}''_B;\ \dot{I}_C = \dot{I}'_C + \dot{I}''_C.$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Эти токи содержат слагающие прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$\dot{I}_{A1}=\frac{1}{3}(\dot{I}_A+\dot{I}_B a+\dot{I}_C a^2)=$$

$$=\dot{I}'_A-\dot{I}''_A+\frac{1}{3}\dot{I}_L=\dot{I}'_A-\dot{I}''_A\frac{3b_C-b_L}{3b_C};$$

$$\dot{I}_{A2}=\frac{1}{3}\left(\dot{I}_A+\dot{I}_B a^2+\dot{I}_C a\right)=$$

$$=-\dot{I}''_A+\frac{1}{3}\dot{I}_L=-\dot{I}''_A\frac{3b_C-b_L}{3b_C};$$

$$\dot{I}_{A0}=\frac{1}{3}(\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C)=\frac{1}{3}\dot{I}_L=\dot{I}''_A\frac{b_L}{3b_C}.$$

Из сказанного выше следует, что слагающие обратной последовательности исчезают из системы линейных токов лишь при полной настройке дугогасящей катушки. В этом случае:

$$\dot{I}''_A=-\dot{I}'_A;\ \dot{I}_L=3\dot{I}''_A;\ \dot{I}_g=0;$$

$$\dot{I}_{A1}=\dot{I}'_A;\ \dot{I}_{A0}=\dot{I}''_A;\ \dot{I}_A=\dot{I}_{A1}+\dot{I}_{A0}=0.$$

Приведенный метод значительно облегчает исследование ряда других существенных явлений в трехфазной системе, как-то: опрокидывание фаз у трехфазного приемника или замыкание на землю одной фазы воздушной линии, присоединенной к шинам станции параллельно с кабельной сетью.

Литература

1. К. А. Круг. Основы электротехники, Госэнергоиздат, т. I, стр. 181, 1946.
2. М. А. Перекалин. Графический метод определения положения нейтрали в трехфазной системе. Электричество, № 9, 1946.
3. К. А. Круг. Основы электротехники. Госэнергоиздат, т. II, стр. 215, 1946.

[31. 1. 1950]

✧ · ✧ ✧

Графический метод расчета переходных процессов в цепи со сталью с учетом гистерезиса

Кандидат техн. наук, доц. В. Е. БОГОЛЮБОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Предлагается метод графического решения нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка с правой частью. Приводится пример применения метода для расчета переходного процесса в цепи со сталью с учетом гистерезиса.

Для разрешения существенно нелинейных задач современная математика часто пользуется не аналитическими методами (дающими слишком громоздкие решения), а модификациями методов численного интегрирования. Разновидностью методов численного интегрирования по существу являются и распространенные для решения существенно нелинейных проблем графические методы. Основы этих методов были заложены в классических работах А. М. Ляпунова и Пуанкаре. Однако особую популярность эти методы приобрели благодаря работам плеяды талантливых советских ученых школы академиков Л. И. Мандельштама и А. А. Андронова.

Одним из наиболее известных методов графического решения нелинейных дифференциальных уравнений является ставший теперь классическим метод изоклин.

Развитием и логическим завершением метода изоклин для дифференциальных уравнений первого порядка является метод двух номографических шкал, определяющих текущее значение производной кривой искомого решения.

Методу изоклин в его классической форме присущ ряд недостатков. Подсчет уравнений изоклин и их построение часто трудоемки; кроме этого, означенный прием не особенно нагляден. Чтобы перейти от фазового портрета системы к кривой в функции времени, часто приходится проделывать сложные манипуляции (особенно в тех случаях, когда система находится под воздействием внешних сил). От этих недостатков свободен метод двух номографических шкал. Для разрешения некоторых задач целесообразно пользоваться модификацией этого метода, предложенной автором, так называемым методом скользящей шкалы. Сущность метода заключается в следующем.

Пусть дифференциальное уравнение первого порядка задано в форме

$$y'=\frac{A_1f_1(x)+B_1g_1(y)+C_1}{A_2f_2(x)+B_2g_2(y)+C_2}. \qquad (1)$$

На рис. 1 изображены обе номографические шкалы u и v, как уже полученные.

Направление касательной к кривой в данной точке плоскости x, y определяется при помощи прямой, соединяющей точки U и V. Тогда, обозначая произвольный масштабный коэффициент через m $(m\neq 0)$, имеем:

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{y_u-y_v}{x_u-x_v}=\frac{m[A_1f_1(x)+B_1g_1(y)+C_1]}{m[A_2f_2(x)+B_2g_2(y)+C_2]}=y'$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

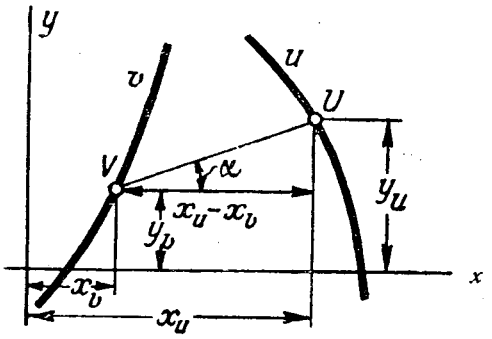

Рис. 1.

или

$$y_u - y_v = m\,[A_1 f_1(x) + B_1 g_1(y) + C_1]$$

и одновременно

$$x_u - x_v = m\,[A_2 f_2(x) + B_2 g_2(y) + C_2],$$

наконец,

$$\left.\begin{aligned} y_u &= mA_1 f_1(x) \\ x_u &= mA_2 f_2(x) \end{aligned}\right\} \qquad (1а)$$

и

$$\left.\begin{aligned} y_v &= -m\,[B_1 g_1(y) + C_1] \\ x_v &= -m\,[B_2 g_2(y) + C_2] \end{aligned}\right\} \qquad (1б)$$

Уравнения (1а) и (1б) дают параметрическое представление функций

$$y_u = f(x_u) \quad \text{и} \quad y_v = f(x_v).$$

Рассмотрим пример применения метода скользящей шкалы для определения закона изменения тока в подмагниченном дросселе, на зажимах которого амплитуда переменного напряжения возрастает по линейному закону. Можно также легко учесть влияние гистерезиса, что было бы очень трудно сделать при решении той же задачи аналитическим методом.

Уравнение цепи, представленной на рис. 2, будет:

$$\frac{d\psi}{d\vartheta} = a\vartheta\cos\vartheta - R_1 i,$$

где

$$R_1 = \frac{R}{\omega}, \quad \text{а} \quad \vartheta = \omega t.$$

Заменяя далее $R_1 i$ через $R_1 f(\psi)$, находим решение для $\psi = f(t)$ и, наконец, по петле гистерезиса получаем соотношение $i = f(t)$.

Параметрические уравнения цепи, согласно (1а) и (1б), будут:

$$\left.\begin{aligned} \psi_u &= ma\vartheta\cos\vartheta \\ \vartheta_u &= 0 \end{aligned}\right\}, \qquad \left.\begin{aligned} \psi_v &= mR_1 f(\psi) \\ \vartheta_v &= -m \end{aligned}\right\}.$$

Следовательно, кривая u представляет собой прямую, совпадающую с осью ординат, а кривая v — также прямая линия, параллельная оси ординат и пересекающая ось абсцисс на расстоянии m, слева от начала координат.

Если бы задача решалась методом двух номографических шкал, то пришлось бы строить для каждого из периодов переменного напряжения

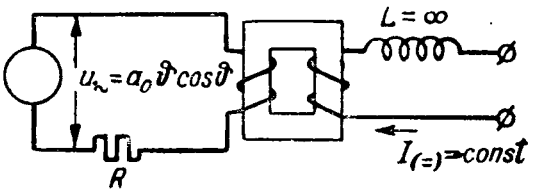

Рис. 2.

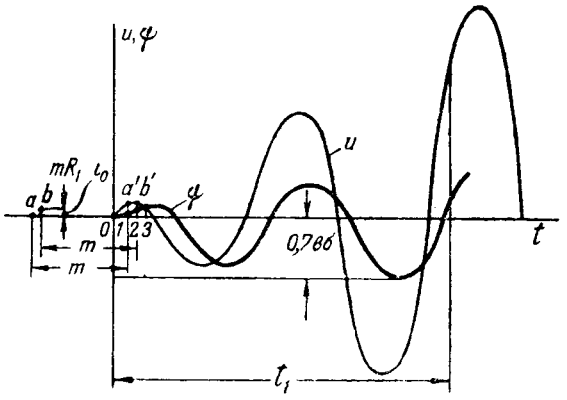

Рис. 3.

две номографические шкалы, и параллельно лучам, соединяющим соответствующие деления этих шкал, проводить касательные к кривой изменения потокосцепления по времени. Переход от кривой потокосцепления к кривой изменения тока по времени производится по известной зависимости (i).

Решение поставленной задачи методом скользящей шкалы проводится следующим образом. Делим весь исследуемый интервал на произвольное число частей (обозначим точки деления цифрами по порядку 0, 1, 2, 3 и т. д.). На участке *0—1* полагаем касательную к кривой потокосцепления по времени горизонтальной (рис. 3). На участке *1—2* направление касательной к искомой кривой должно быть параллельно линии, мысленно проведенной от точки a, находящейся на оси абсцисс на расстоянии m влево от точки *1*, до точки a', лежащей на пересечении кривой u и вертикали, восстановленной от той же точки *1*. По кривой зависимости потокосцепления от тока (которая непосредственно получается по заданной кривой намагничивания) определяем значение тока i_0, соответствующее величине потокосцепления в точке *2*.

На участке *2—3* направление касательной к кривой потокосцепления будет параллельно лучу, мысленно проведенному от точки b, отстоящей на расстоянии m влево от точки *2*, ордината которой равна $mR_1 i_0$, до точки b' кривой u, соответствующей моменту *2*. Далее процесс построения повторяется аналогично.

Поясним кратко, как в процессе построения определять значения тока, соответствующие текущим значениям потокосцепления, пользуясь петлями $\psi(i)$, получающимися по петлям гистерезиса. Семейство кривых $\psi(i)$, соответствующих данной задаче, изображено на рис. 4. Покажем, как находить значение $i(\psi)$ для произвольного момента времени, обозначенного t_1 на рис. 3.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

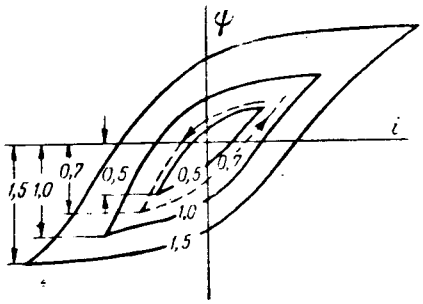

Рис. 4.

Предшествовавшее наибольшее (отрицательное) значение ψ было 0,7 *вб*. Соответственно этому значению проводим пунктирную линию, интерполируя расстояние между соседними петлями. По этой пунктирной кривой и определяем зависимость $\psi(i)$ вплоть до следующего максимума, после которого определение $i(\psi)$ будет производиться по следующей кривой, соответствующей этому максимуму, и т. д. Наличие подмагничивания не усложняет задачи, оно лишь меняет конфигурацию и расположение петель гистерезиса.

Предлагаемый метод отличается тем, что никаких номографических шкал чертить не требуется. Они скользят вдоль оси абсцисс по мере решения задачи. На чертеже никаких вспомогательных линий не наносится. Наносятся только точки, соответствующие значениям произведения miR_1 для выделенных моментов времени. В итоге построения, как побочный результат, получаем чрезвычайно важную зависимость $i(t)$, ради которой часто и проводят все это построение.

[26. 8. 1949]

◇ ◇ ◇

Об одном методе анализа переходных процессов в линейных четырехполюсниках

Кандидат техн. наук А. А. РИЗКИН

Ленинградский электротехнический институт связи им. Бонч-Бруевича

Показана возможность распространения метода для анализа переходных процессов в линейных избирательных четырехполюсниках, на более общий случай любого линейного четырехполюсника. Это дает возможность применять данный метод не только при решении сравнительно ограниченного числа задачи радиотехники, но также и при решении гораздо более широкого круга вопросов общей электротехники.

С. И. Евтянов [Л. 1] дает рационализированный метод расчета переходных процессов в избирательных линейных четырехполюсниках, разработанный им на основе операционного исчисления, интеграла Дюамеля и метода медленно изменяющихся амплитуд (метод Ван-Дер-Поля). Автор показывает на ряде примеров из области избирательных радиотехнических схем, что применение этого метода весьма сокращает и упрощает выкладки и является вполне рациональным. К сожалению, однако, все необходимые соотношения С. И. Евтянов выводит в приближенной форме и только применительно к системам, обладающим весьма высокой избирательностью. В частности, вводимая им теорема Дюамеля для огибающих доказывается лишь в нулевом приближении (относительно малого параметра, пропорционального затуханию системы). Таким образом, применить результаты, полученные Евтяновым, к системам апериодического типа не представляется возможным.

Здесь мы хотим показать, что метод, аналогичный тому, который применяет С. И. Евтянов, может быть обоснован совершенно строго и применен к любому линейному четырехполюснику, вне зависимости от того, обладает ли он какими-либо избирательными свойствами или нет. Поэтому нет необходимости ограничивать применение метода только задачами радиотехники, где обычно рассматриваются системы, имеющие резко выраженную избирательность. Метод может быть с успехом распространен на более широкий класс задач общей электротехники, если его не ограничивать заранее приближениями, основанными на избирательных свойствах системы.

Существо метода заключается в следующем.

Дан линейный четырехполюсник, характеризующийся коэффициентом передачи $K(j\omega)$ и переходной функцией $a(t)$. Предположим, что на вход четырехполюсника в момент $t=0$ подано напряжение

$$e(t)=\dot{E}(t)\,e^{j\omega_s t}. \tag{1}$$

Такая форма не ограничивает общности задачи, так как на $\dot{E}(t)$ не наложено ограничений, а частота внешнего воздействия ω_s может быть, в частности, равна нулю. Вместе с тем, она весьма удобна для исследования при внешних воздействиях, имеющих гармоническую основу.

Пользуясь теоремой Дюамеля, получим для напряжения на выходе четырехполюсника выражение:

$$\dot{U}(t)=\left[a(0)\dot{E}(t)+\int_0^t a'(\tau)\dot{E}(t-\tau)e^{-j\omega_s\tau}d\tau\right]e^{j\omega_s t}=$$

$$=\dot{D}(t)e^{j\omega_s t}, \tag{2}$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где обозначено

$$\dot{D}(t)=a(0)\dot{E}(t)+\int_0 a'(\tau)\dot{E}(t-\tau)e^{-j\omega_s\tau}\,d\tau.$$

Значение $\dot{D}(t)$, соответствующее случаю $\dot{E}(t)=1(t)$, обозначим через $\dot{B}(t)$ и назовем переходной амплитудой[1]; тогда на основании (2) для переходной амплитуды будем иметь:

$$\dot{B}(t)=a(0)+\int_0^t a'(\tau)e^{-j\omega_s\tau}\,d\tau. \qquad (3)$$

Выражение (3) непосредственно решает задачу о переходных процессах в системе при подаче на вход единичной амплитуды частоты ω_s и лежит в основе данного метода.

Чтобы выразить выходное напряжение в общем случае при любом значении $\dot{E}(t)$ через $\dot{B}(t)$, проинтегрируем выражение $\dot{D}(t)$ по частям с учетом (3). Тогда получим:

$$\dot{D}(t)=\dot{E}(0)\dot{B}(t)+\int_0^t \dot{B}(\tau)\dot{E}'(t-\tau)\,d\tau. \qquad (4a)$$

Выражение (4a) полностью совпадает с одной из форм интеграла Дюамеля для огибающих, данной в работе Евтянова, но предложенный вывод в отличие от вывода Евтянова убеждает нас в том, что теорема Дюамеля для огибающих является вполне строгим соотношением, применимым к любому линейному четырехполюснику, независимо от того, обладает ли он какими-либо избирательными свойствами или нет.

Выражение (4a) полностью совпадает с одной из форм интеграла Дюамеля для мгновенных значений и оно может быть представлено и в любой другой известной форме интеграла Дюамеля, например в форме:

$$\dot{D}(t)=\dot{B}(0)\dot{E}(t)+\int_0^t \dot{B}'(\tau)\dot{E}(t-\tau)\,d\tau \qquad (4b)$$

или в форме

$$\dot{D}(t)=\frac{d}{dt}\int_0^t \dot{B}(\tau)\dot{E}(t-\tau)\,d\tau \qquad (4c)$$

и т. д.

Приведенные соотношения легко представить и в операционной форме.

В самом деле, из самого определения коэффициента передачи $K(j\omega)$ следует операционное соотношение:

$$\dot{D}(t)e^{j\omega_s t}\doteqdot K(p)\dot{E}(t)e^{j\omega_s t}\doteqdot e^{j\omega_s t}K(p+j\omega_s)\dot{E}(t),$$

откуда

$$\dot{D}(t)=K(p+j\omega_s)\dot{E}(t). \qquad (5)$$

Это соотношение при $\dot{E}(t)=1(t)$ принимает вид:

$$\dot{B}(t)=K(p+j\omega_s)1(t). \qquad (6)$$

Таким образом, операторное выражение для переходной амплитуды $\dot{B}(t)$ получается из операторного выражения для переходной функции $a(t)$ путем замены в последней оператора p на $p+j\omega_s$.

Что касается производной от переходной функции $a'(t)$, входящей в (3), то, учитывая, что $a(t)\doteqdot K(p)1(t)$, получим:

$$a'(t)\doteqdot p[K(p)-a(o)]\,1(t). \qquad (7)$$

Если $a(0)=0$, то последнее выражение удобно представить в интегральной форме:

$$a'(t)=\frac{1}{2\pi j}\cdot\int_{-j\infty}^{j\infty}K(p)e^{pt}\,dp. \qquad (8)$$

Для нахождения приближенных решений для избирательных систем не требуется выводить никаких других соотношений, кроме приведенных. Приближение заключается лишь в том, что вместо точных выражений для $K(j\omega)$ используются те приближенные выражения, которые обычно применяются при анализе установившегося режима линейных избирательных систем.

Однако, как уже было указано, сами по себе приведенные здесь соотношения являются вполне строгими и общими и применимы к любому линейному четырехполюснику, вне зависимости от его избирательных свойств и приложимости к нему приближенного метода Ван-дер-Поля. Что касается результатов расчета, то эти результаты как по приведенным здесь формулам, так и по формулам Евтянова оказываются тождественными[2].

По найденному тем или иным путем [по формуле (3) или (6)] выражению для переходной амплитуды $\dot{B}(t)$ нетрудно затем вычислить и мгновенное значение напряжения на выходе $u(t)$; например, если входное напряжение $e(t)=\dot{E}(t)\times\cos(\omega_s t+\theta)$, то выходное напряжение

$$u(t)=Re[\dot{D}(t)e^{(j\omega_s t+\theta)}].$$

Величина $\dot{D}(t)$ по заданному значению $\dot{E}(t)$ и найденному значению $\dot{B}(t)$ определяется одной из формул (4), или непосредственно по формуле (5).

Литература

1. С. И. Евтянов. Переходные процессы в приемноусилительных схемах. Связьиздат, 1948.

[5. 9. 1949]

[1] Если $e(t)=1(t)$, то $E(t)=1(t)$ и $\omega_s=0$, тогда $\dot{B}(t)=a(t)$, т. е. при подаче на вход единичной функции выражение для переходной амплитуды совпадает с выражением для переходной функции.

[2] Каждая из формул книги (2, 4, 7) и (3; 3, 3) в отдельности является приближенной и не имеет смысла для апериодических систем, но подстановка их дает тот же результат, что подстановка (8) в (3) при $a(0)=0$.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Теорема о нелинейном четырехполюснике[1]

Кандидат техн. наук С. А. ГИНЗБУРГ

Москва

Доказана теорема о нелинейном четырехполюснике, имеющая важное значение для расчета нелинейных схем и дающая зависимость динамической проводимости четырехполюсника от динамических проводимостей входящих в него нелинейных элементов. Предложен основанный на теореме общий метод построения вольтамперной характеристики нелинейного четырехполюсника с любым числом нелинейных элементов по заданным для них характеристикам, а также частные методы для нелинейных четырехполюсников с одним и двумя нелинейными элементами.

Электрические цепи с нелинейными элементами широко применяются в автоматике, измерительной технике и радиотехнике. Нелинейным элементом электрической цепи мы называем такой элемент, проводимость которого изменяется при изменении величины тока, проходящего через него. Нелинейный элемент может обладать активной и реактивной проводимостями. Ниже мы будем рассматривать электрические цепи постоянного и переменного тока, состоящие исключительно из активных проводимостей. Для постоянного тока никаких дополнительных ограничений на нелинейные элементы здесь не накладывается. Для переменного тока будем считать, что нелинейные элементы инерционны, т. е. их проводимость не изменяется в течение периода переменного тока и поэтому они не искажают формы кривой тока и напряжения. Таким образом, излагаемая ниже теория непосредственно распространяется при постоянном токе на любые активные нелинейные элементы, включая купроксные выпрямители, вакуумные диоды, неоновые лампы и т. п., а при переменном токе — только на тепловые нелинейные элементы, как-то: бареторы, лампы накаливания, термисторы и т. п.— при достаточной их инерционности.

Характеристика рассмотренного выше активного нелинейного элемента может быть однозначно представлена на плоскости (рис. 1,*а*). Если рабочую точку *A* характеристики соединить прямой с началом координат и провести в этой точке касательную к кривой, то, рассматривая тангенсы углов α и σ, найдем:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{I}{U} = y, \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}\sigma = \frac{dI}{dU} = \gamma, \quad (2)$$

где y — статическая проводимость нелинейного элемента в данной точке;

γ — динамическая (дифференциальная) проводимость нелинейного элемента в данной точке.

Зависимости статической и динамической проводимостей от напряжения на нелинейном элементе могут быть построены на отдельном графике (рис. 1,*б*). Мы рассматриваем в данной статье проводимости, а не сопротивления, исключительно ради удобства написания формул. На рис. 1 и далее показаны характеристики таких нелинейных элементов, у которых $y > \gamma$. Это сделано только для определенности. Никаких ограничений на соотношения между y и γ излагаемая ниже теория не накладывает.

Рассмотрим пассивный четырехполюсник с входом *A* и выходом *B*, содержащий *N* нелинейных элементов в контурах 1, 2 . . . *N* (рис. 2,*а*). Для сравнения с активным четырехполюсником на рисунке показаны контуры 0*1*, 0*2* . . . 0*M*, в которые могут вводиться источники э. д. с. Для пассивного нелинейного четырехполюсника величины взаимных статической и динамической проводимостей контура *B* по отношению к контуру *A* обозначим следующим образом:

$$\frac{I_{pB}}{U_A} = y_{pAB}, \quad (3)$$

$$\frac{dI_{pB}}{dU_A} = \gamma_{pAB}, \quad (4)$$

здесь индекс *p* характеризует пассивный четырехполюсник.

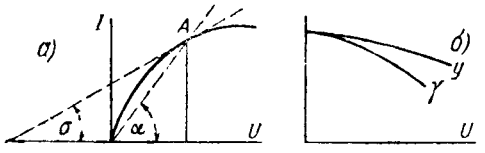

Рис. 1.

[1] Настоящая работа в первоначальном виде доложена на заседании НТО МЭИ 4 мая 1949 г. и на научной сессии, посвященной празднованию Дня радио 8 мая 1949 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

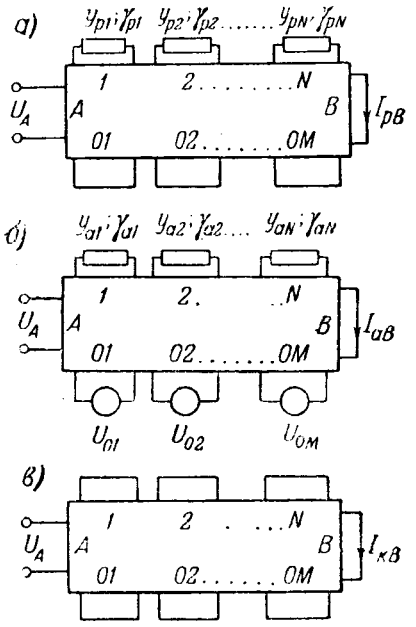

Рис. 2.

Теперь рассмотрим активный четырехполюсник (рис. 2,*б*), содержащий, помимо N нелинейных элементов, M источников э. д. с. (кроме э. д. с. U_A). В этом случае нельзя обычным путем определить взаимные проводимости контуров A и B, поскольку эти проводимости зависят не только от э. д. с. U_A, но и от всех э. д. с. U_{01}, U_{02}, . . ., U_{0M}. Однако для дальнейших выводов очень удобно ввести чисто условные понятия взаимных статической и динамической проводимостей, аналогично равенствам (3) и (4),

$$\frac{I_{aB}}{U_A} = y_{aAB}, \tag{5}$$

$$\frac{dI_{aB}}{dU_A} = \gamma_{aAB}. \tag{6}$$

Индекс a характеризует активный четырехполюсник.

Для дальнейших выводов нам также необходимо ввести обозначение взаимной проводимости тех же контуров пассивного четырехполюсника в случае (рис. 2,*в*), когда нелинейные элементы исключены (закорочены). При этом остается линейный четырехполюсник, и понятия статической и динамической проводимостей совпадают

$$\frac{I_{kB}}{U_A} = \frac{dI_{kB}}{dU_A} = y_{kAB}. \tag{7}$$

Индекс k характеризует исключение нелинейных элементов. Аналогично взаимным проводимостям контуров A и B обозначаются взаимные статические и динамические проводимости любых двух других контуров или проводимость четырехполюсника по отношению к какому-либо контуру. В последнем случае индекс контура повторяется два раза (например, y_{p11}, γ_{a22}, y_{k33} и т. п.). Проводимости нелинейных элементов обозначаются с одним индексом номера элемента (например, y_{p1}, γ_{a2} и т. п.).

Будем считать, что вольтамперные характеристики нелинейных элементов нам заданы, а следовательно, известны кривые их статических и динамических проводимостей. Для исследования свойств нелинейного четырехполюсника нам необходимо определить его статическую и динамическую проводимости в каждой рабочей точке в зависимости от проводимостей нелинейных элементов. Это дает возможность построить вольтамперную характеристику нелинейного четырехполюсника.

Данный вопрос затронут в литературе лишь для некоторых частных случаев. Так, Р. Р. Харченко [Л. 1] на основании общих заключений показал зависимость коэффициента стабилизации нелинейного четырехполюсника от динамических сопротивлений нелинейных элементов для недифференциальных стабилизаторов, Б. С. Сотсков [Л. 2] вывел зависимость производной силы тока или напряжения диагонали мостовой схемы по напряжению питания от динамических сопротивлений нелинейных плеч моста.

Ниже мы приводим теорему, определяющую искомую зависимость в самом общем виде для любого из рассмотренных нами выше нелинейных четырехполюсников. Эта теорема имеет важнейшее значение для расчета нелинейных схем.

Теорема. *Зависимость динамической проводимости нелинейного четырехполюсника (пассивного или активного) от динамических проводимостей входящих в него нелинейных элементов выражается той же функцией, что и зависимость статической проводимости пассивного четырехполюсника от статических проводимостей нелинейных элементов.*

Иначе говоря, если, например, зависимость взаимной, статической проводимости контуров A и B пассивного четырехполюсника (рис. 2,*а*) от статических проводимостей нелинейных элементов выражается функцией

$$y_{pAB} = f(y_{p1}; y_{p2} \ldots y_{pN}), \tag{8}$$

то взаимная динамическая проводимость этих контуров для пассивного (рис. 2,*а*) или активного (рис. 2,*б*) четырехполюсников получается путем подстановки в эту функцию динамических проводимостей нелинейных элементов взамен статических

$$\gamma_{pAB} = f(\gamma_{p1}; \gamma_{p2} \ldots \gamma_{pN}), \tag{9}$$

$$\gamma_{aAB} = f(\gamma_{a1}; \gamma_{a2} \ldots \gamma_{aN}). \tag{10}$$

При введении в четырехполюсник э. д. с. U_{01}, $U_{02}, \ldots, U_{0M}$ проводимости нелинейных элементов, конечно, изменяются, поэтому $\gamma_p \neq \gamma_a$, но принципиальный характер зависимости для пассивного (9) и активного (10) четырехполюсника один и тот же.

Доказательство теоремы основывается на применении метода эквивалентной э. д. с. и дано в приложении.

Применим изложенную теорему для построения вольтамперной характеристики нелинейного

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

четырехполюсника. Задача ставится следующим образом. Известны снятые экспериментально и представленные графически характеристики нелинейных элементов, построение схемы и величины э. д. с. источников, действующих в схеме. Требуется определить значения тока в некотором контуре, например B, при любом значении одной из э. д. с., например U_A. Однако для определения тока необходимо знать проводимости нелинейных элементов при данном режиме работы схемы, а таковые нам неизвестны. Проводимости нелинейных элементов нам известны лишь при одном режиме — при отсутствии э. д. с. в схеме и токах, равных нулю. Поэтому эти нулевые проводимости нелинейных элементов являются отправной точкой для построения вольтамперной характеристики четырехполюсника. Для получения искомой характеристики применим метод конечных приращений.

Рассмотрим в первую очередь пассивный нелинейный четырехполюсник (рис. 2,*а*). Пусть вольтамперная характеристика для контуров A и B уже построена (рис. 3,*г*). Разделим ось напряжений на Q равных или неравных частей $\Delta U_A^{\mathrm{I}}; \Delta U_A^{\mathrm{II}} \ldots \Delta U_A^{Q}$. Пусть этим приращениям соответствуют приращения напряжений на нелинейных элементах $\Delta U_{p1}^{\mathrm{I}}; \Delta U_{p1}^{\mathrm{II}} \ldots \Delta U_{p1}^{Q}$ (рис. 3,*а*), $\Delta U_{p2}^{\mathrm{I}}; \Delta U_{p2}^{\mathrm{II}} \ldots \Delta U_{p2}^{Q}$ (рис. 3,*б*) и т. д. до $\Delta U_{pN}^{\mathrm{I}}$, $\Delta U_{pN}^{\mathrm{II}} \ldots \Delta U_{pN}^{Q}$ (рис. 3,*в*).

Характеристики нелинейных элементов представим в виде зависимостей динамических проводимостей от приложенных напряжений. При этом, заменяя плавную характеристику ступенчатой кривой, получим в пределах каждого приращения напряжения постоянное значение динамической проводимости нелинейного элемента. Для каждого приращения напряжения справедлива зависимость (9) между взаимной динамической проводимостью контуров A и B и динамическими проводимостями нелинейных элементов. Поэтому можно написать

$$\left.\begin{aligned} \gamma_{pAB}^{\mathrm{I}} &= f(\gamma_{p1}^{\mathrm{I}};\ \gamma_{p2}^{\mathrm{I}} \ldots \gamma_{pN}^{\mathrm{I}}), \\ \gamma_{pAB}^{\mathrm{II}} &= f(\gamma_{p1}^{\mathrm{II}};\ \gamma_{p2}^{\mathrm{II}} \ldots \gamma_{pN}^{\mathrm{II}}), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \gamma_{pAB}^{Q} &= f(\gamma_{p1}^{Q};\ \gamma_{p2}^{Q} \ldots \gamma_{pN}^{Q}). \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

Используем равенства, аналогичные системе (X), приведенной в приложении и определяющей зависимости производных напряжения на нелинейных элементах по U_A от динамических проводимостей нелинейных элементов, но для пассивного четырехполюсника. Переходя от производных к конечным приращениям, получаем следующие соотношения между первыми приращениями напряжений на нелинейных элементах и первым приращением напряжения U_A, считая от нуля напряжений,

$$\left.\begin{aligned} \Delta U_{p1}^{\mathrm{I}} &= \varphi_1(\gamma_{p1}^{\mathrm{I}};\ \gamma_{p2}^{\mathrm{I}} \ldots \gamma_{pN}^{\mathrm{I}}) \cdot \Delta U_A^{\mathrm{I}}, \\ \Delta U_{p2}^{\mathrm{I}} &= \varphi_2(\gamma_{p1}^{\mathrm{I}};\ \gamma_{p2}^{\mathrm{I}} \ldots \gamma_{pN}^{\mathrm{I}}) \cdot \Delta U_A^{\mathrm{I}}, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Delta U_{pN}^{\mathrm{I}} &= \varphi_N(\gamma_{p1}^{\mathrm{I}};\ \gamma_{p2}^{\mathrm{I}} \ldots \gamma_{pN}^{\mathrm{I}}) \cdot \Delta U_A^{\mathrm{I}}. \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

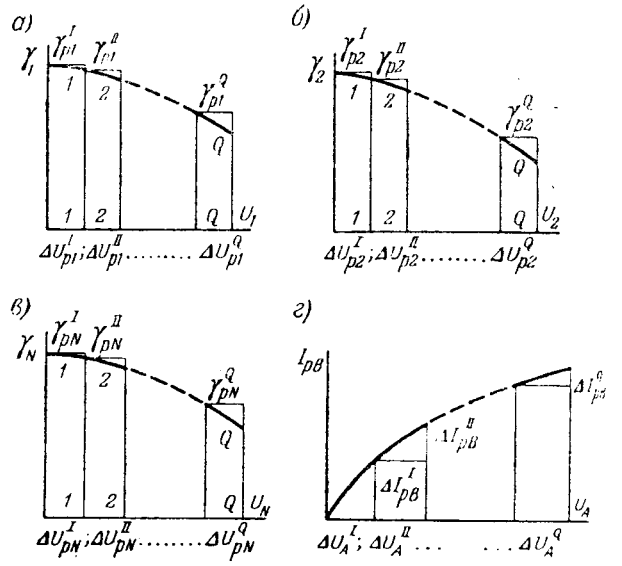

Рис. 3.

Аналогично для вторых, третьих и т. д. приращений получим систему равенств, подобную (12), но с верхними индексами II, III и т. д. до Q.

Приращения силы тока в контуре B равны

$$\left.\begin{aligned} \Delta I_{pB}^{\mathrm{I}} &= \gamma_{pAB}^{\mathrm{I}} \cdot \Delta U_A^{\mathrm{I}}, \\ \Delta I_{pB}^{\mathrm{II}} &= \gamma_{pAB}^{\mathrm{II}} \cdot \Delta U_A^{\mathrm{II}}, \\ &\ldots\ldots\ldots \\ \Delta I_{pB}^{Q} &= \gamma_{pAB}^{Q} \cdot \Delta U_A^{Q}; \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

конечное значение тока равно

$$I_{pB} = \Delta I_{pB}^{\mathrm{I}} + \Delta I_{pB}^{\mathrm{II}} + \ldots + \Delta I_{pB}^{Q}. \qquad (14)$$

Построение вольтамперной характеристики $I_{pB} = f_{pB}(U_A)$ может производиться, исходя из вышеизложенного, следующим образом. Поскольку нам известны начальные проводимости нелинейных элементов $\gamma_{p1}^{\mathrm{I}}, \gamma_{p2}^{\mathrm{I}}, \ldots, \gamma_{pN}^{\mathrm{I}}$, то мы сразу же из (11) находим $\gamma_{pAB}^{\mathrm{I}}$. Отсюда, задаваясь ΔU_A^{I}, определяем $\Delta I_{pB}^{\mathrm{I}}$ из (13) и $\Delta U_{p1}^{\mathrm{I}}$, $\Delta U_{p2}^{\mathrm{I}}, \ldots, \Delta U_{pN}^{\mathrm{I}}$ из (12). Восстанавливая перпендикуляры *11* (рис. 3,*а*, *б*, *в*) до пересечения с кривыми $\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_N$, мы находим следующие значения динамических проводимостей $\gamma_{p1}^{\mathrm{II}}$, $\gamma_{p2}^{\mathrm{II}}, \ldots, \gamma_{pN}^{\mathrm{II}}$, определяем $\gamma_{pAB}^{\mathrm{II}}$ из (11), затем, задаваясь ΔU_A^{II}, находим величины вторых приращений напряжения на нелинейных элементах $\Delta U_{p1}^{\mathrm{II}}$, $\Delta U_{p2}^{\mathrm{II}}, \ldots, \Delta U_{pN}^{\mathrm{II}}$ и, наконец, приращение тока $\Delta I_{pB}^{\mathrm{II}}$. Снова восстанавливая перпендикуляры *22*, определяем следующие значения динамических проводимостей $\gamma_{p1}^{\mathrm{III}}, \gamma_{p2}^{\mathrm{III}}, \ldots, \gamma_{pN}^{\mathrm{III}}$ и т. д. Суммируя приращения тока, находим из (14) значение тока в контуре B при любом значении напряжения U_A.

На рис. 3,*г* показана для ясности только вольтамперная характеристика $I_{pB} = f_{pB}(U_A)$. Однако уже в ходе самого построения определяется

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

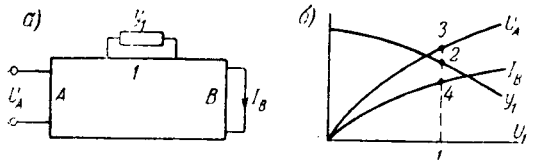

Рис. 4.

из (11) зависимость взаимной динамической проводимости γ_{pAB} от U_A и, разумеется, может быть построена также кривая взаимной статической проводимости.

В случае активного четырехполюсника для построения $I_{aB}=f_{aB}(U_A)$ необходимо раньше всего определить начальное значение тока в контуре B и начальные величины проводимостей нелинейных элементов при $U_A=0$, т. е. под действием одних только э. д. с. U_{01}; $U_{02}\ldots U_{0M}$. Это можно сделать, если, рассматривая четырехполюсник как пассивный, найти описанным выше способом ток в контуре B и динамические проводимости нелинейных элементов сперва под действием одной э. д. с. U_{01}, затем, добавляя U_{02}, найти эти величины под суммарным действием U_{01} и U_{02} и т. д., пока не будут найдены ток и проводимости под действием всех э. д. с. U_{01}, U_{02}, ..., U_{0M}. После этого, принимая полученные величины за начальные, можно определять искомую зависимость.

Если четырехполюсник содержит только один или два нелинейных элемента, то построение вольтамперной характеристики его может быть произведено значительно более простым способом. Поскольку построение такой характеристики для пассивного и активного четырехполюсников принципиально не отличаются друг от друга, то мы рассмотрим ниже лишь пассивные четырехполюсники и индекс p опустим. Возьмем четырехполюсник с одним нелинейным элементом (рис. 4,*а*). Зависимости между токами, напряжениями и проводимостями нелинейных элементов, приведенные в приложении, здесь значительно упрощаются. Система (VI) сводится к одному первому уравнению, решение которого, представленное в общем виде первым равенством системы (VII), имеет вид:

$$\frac{U_1}{U_A}=\frac{y_{kA1}}{y_1+y_{k11}}. \qquad (15)$$

Подставляя это решение в уравнение (V), для одного нелинейного элемента получаем:

$$y_{AB}=y_{kAB}-\frac{y_{kA1}y_{k1B}}{y_1+y_{k11}}. \qquad (16)$$

Выражения (15) и (16) можно переписать так:

$$U_A=\frac{y_1+y_{k11}}{y_{kA1}}\cdot U_1, \qquad (17)$$

$$I_B=y_{AB}\cdot U_A=\left(y_{kAB}-\frac{y_{kA1}\cdot y_{k1B}}{y_1+y_{k11}}\right)\cdot U_A. \qquad (18)$$

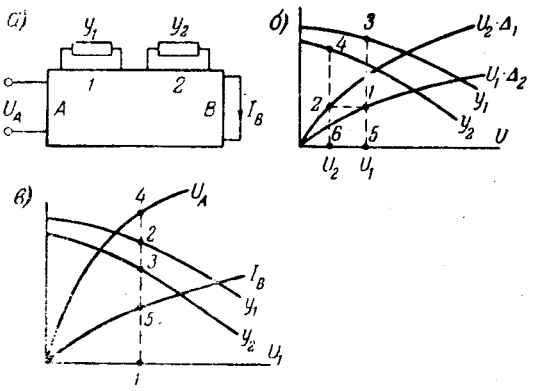

Рис. 5.

Поскольку зависимость $y_1=f_1(U_1)$ нам задана (рис. 4,*б*), то, подставляя в (17) различные значения U_1 и соответствующие значения y_1, мы получаем зависимость между U_A и y_1. Теперь, подставляя соответствующие значения U_A и y_1 в (18), мы получаем зависимость I_B от U_A, т. е. вольтамперную характеристику нелинейного четырехполюсника. На графике (рис. 4,*б*) мы строим, следовательно, точку *3* по точкам *1* и *2* и затем точку *4* по точкам *2* и *3*. Вольтамперную характеристику $I_B=f_B(U_A)$ удобно вынести на отдельный график.

Рассмотрим теперь нелинейный четырехполюсник с двумя нелинейными элементами (рис. 5,*а*). Воспользуемся снова общими формулами, данными в приложении. Система (VI) в этом случае состоит из двух уравнений, решение которых, представленное в общем виде двумя первыми равенствами (VII), сводится к следующему:

$$\frac{U_1}{U_A}=\frac{\Delta_1}{\Delta}, \qquad (19)$$

$$\frac{U_2}{U_A}=\frac{\Delta_2}{\Delta}. \qquad (20)$$

Подставляя эти решения в уравнение (V), для двух нелинейных элементов получим:

$$y_{AB}=y_{kAB}-\frac{\Delta_1 y_{k1B}+\Delta_2 y_{k2B}}{\Delta}. \qquad (21)$$

В выражениях (19), (20) и (21) детерминанты имеют следующие значения

$$\Delta_1=\begin{vmatrix} y_{kA1} & y_{k21} \\ y_{kA2} & y_2+y_{k22} \end{vmatrix}, \qquad (22)$$

$$\Delta_2=\begin{vmatrix} y_1+y_{k11} & y_{kA1} \\ y_{k12} & y_{kA2} \end{vmatrix}, \qquad (23)$$

$$\Delta=\begin{vmatrix} y_1+y_{k11} & y_{k21} \\ y_{k12} & y_2+y_{k22} \end{vmatrix}. \qquad (24)$$

Для построения вольтамперной характеристики необходимо раньше всего найти зависи-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

мость между y_1 и y_2 при работе схемы. Из сопоставления выражений (19) и (20) легко видеть, что

$$U_2 \cdot \Delta_1 = U_1 \cdot \Delta_2. \qquad (25)$$

Поскольку в Δ_1 входит только y_2, а в Δ_2 только y_1, то мы можем при заданных зависимостях $y_1 = f_1(U_1)$ и $y_2 = f_2(U_2)$ построить на одном графике левую и правую части равенства (25), что и показано на рис. 5,*б*. Если теперь проводить прямые, параллельные оси абсцисс, т. е. находить равные значения $U_2\Delta_1$ и $U_1\Delta_2$ и в точках (например *1* и *2*) пересечения этих прямых с найденными кривыми восстанавливать ординаты до пересечения с кривыми y_1 и y_2, то точки *3*, *4*, *5* и *6* дадут взаимную зависимость между U_1, y_1 и U_2, y_2. Поэтому мы можем на отдельном графике построить зависимость y_1 и y_2, например от U_1 (рис. 5,*в*). Далее, используя, например, выражение (19) и подставляя соответствующие значения y_2, строим зависимость U_A от U_1. Наконец, приводя выражение (21) к виду, аналогичному (18), строим зависимость I_B от U_A, подставляя соответствующие значения y_1 и y_2. Следовательно, построение (рис. 5,*в*) ведется в следующем порядке: по точкам *1* и *2* строится точка *3*, по точкам *1*, *2* и *3* строится точка *4*, по точкам *2*, *3* и *4* строится точка *5*. Зависимость I_B от U_A, т. е. вольтамперную характеристику нелинейного элемента, удобно вынести на отдельный график. Если четырехполюсник имеет 3 и более нелинейных элемента, то, например, Δ_1 в выражении (19) будет содержать не только y_2, но и y_3, y_4 и т. д. Поэтому построение вольтамперной характеристики в этом случае описанным способом невозможно.

Предложенная теорема о нелинейном четырехполюснике оказывается весьма полезной при расчете нелинейных схем, применяемых на практике: дифференциальных стабилизаторов напряжения (условие стабилизации $\gamma_{AB} = 0$), уравновешенных индикаторных схем (условие равновесия $y_{AB} = 0$) и многих других. Однако рассмотрение методов расчета этих схем выходит за пределы настоящей статьи.

Приложение.

Известно, что величина тока в электрической цепи не изменится, если вместо некоторой проводимости включить в цепь источник, э. д. с. которого равна падению напряжения на этой проводимости с обратным знаком. Рассмотрим сперва активный четырехполюсник (рис. 2,*б*). Пусть падения напряжений на нелинейных элементах составляют $U_{a1}, U_{a2}, \ldots, U_{aN}$. Включим взамен нелинейных элементов источники с эквивалентными э. д. с. $-U_{a1}, -U_{a2}, \ldots, -U_{aN}$ (рис. 6,*а*). Таким образом, мы как бы исключаем нелинейные элементы из схемы и заменяем ее линейной схемой, но содержащей ряд дополнительных э. д. с. Поэтому при определении токов от всех действующих в схеме э. д. с. мы можем пользоваться методом наложения. Определяя токи в контурах *B*, 1, 2, ..., *N*, получаем:

$$I_{aB} = U_A y_{kAB} - \sum_{n=1}^{N} U_{an} y_{knB} + \sum_{m=1}^{M} U_{0m} y_{k0mB}; \qquad (I)$$

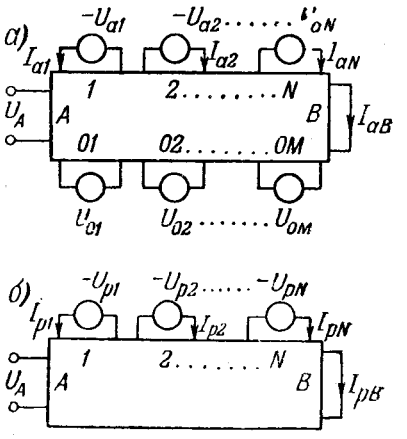

Рис. 6.

$$\left.\begin{aligned} I_{a1} &= U_A y_{kA1} - \sum_{n=1}^{N} U_{an} y_{kn1} + \sum_{m=1}^{M} U_{0m} y_{k0m1}, \\ I_{a2} &= U_A y_{kA2} - \sum_{n=1}^{N} U_{an} y_{kn2} + \sum_{m=1}^{M} U_{0m} y_{k0m2}, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ I_{aN} &= U_A y_{kAN} - \sum_{n=1}^{N} U_{an} y_{knN} + \sum_{m=1}^{M} U_{0m} y_{k0mN}. \end{aligned}\right\} \qquad (II)$$

В случае пассивного четырехполюсника (рис. 2,*а* и 6,*б*), когда $U_{01} = U_{02}, \ldots, U_{0M} = 0$, получаем следующие уравнения:

$$I_{pB} = U_A y_{kAB} - \sum_{n=1}^{N} U_{pn} y_{kn}; \qquad (III)$$

$$\left.\begin{aligned} I_{p1} &= U_A y_{kA1} - \sum_{n=1}^{N} U_{pn} y_{kn1}, \\ I_{p2} &= U_A y_{kA2} - \sum_{n=1}^{N} U_{pn} y_{kn2}, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ I_{pN} &= U_A y_{kAN} - \sum_{n=1}^{N} U_{pn} y_{knN}. \end{aligned}\right\} \qquad (IV)$$

Поскольку четырехполюсник, остающийся после исключения нелинейных элементов, линейный, то все проводимости с индексом *k* нам известны (рис. 2,*в*) и не зависят от режима работы схемы.

Если разделить обе части уравнения (III) на U_A, то, принимая во внимание равенство (3), получим:

$$y_{pAB} = y_{kAB} - \sum_{n=1}^{N} \frac{U_{pn}}{U_A} y_{knB}. \qquad (V)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Если разделить обе части уравнений системы (IV) соответственно на $U_{p1}, U_{p2}, \ldots, U_{pN}$, то после преобразований получим:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{U_{p1}}{U_A} y_{p1} + \sum_{n=1}^{N} \frac{U_{pn}}{U_A} y_{kn1} = y_{kA1}, \\ &\frac{U_{p2}}{U_A} y_{p2} + \sum_{n=1}^{N} \frac{U_{pn}}{U_A} y_{kn2} = y_{kA2}, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &\frac{U_{pN}}{U_A} y_{pN} + \sum_{n=1}^{N} \frac{U_{pn}}{U_A} y_{knN} = y_{kAN}. \end{aligned}\right\} \quad \text{(VI)}$$

Система (VI) содержит N уравнений с N неизвестными $\frac{U_{p1}}{U_A}; \frac{U_{p2}}{U_A} \ldots \frac{U_{pN}}{U_A}$. Пусть решение этой системы выражается некоторыми функциями

$$\left.\begin{aligned} &\frac{U_{p1}}{U_A} = \varphi_1(y_{p1}; y_{p2} \ldots y_{pN}), \\ &\frac{U_{p2}}{U_A} = \varphi_2(y_{p1}; y_{p2} \ldots y_{pN}), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &\frac{U_{pN}}{U_A} = \varphi_N(y_{p1}; y_{p2} \ldots y_{pN}). \end{aligned}\right\} \quad \text{(VII)}$$

Подставляя значения (VII) в уравнение (V), мы получаем выражение взаимной статической проводимости контуров A и B пассивного четырехполюсника в зависимости от статических проводимостей нелинейных элементов, определяемое некоторой функцией (9), приведенной выше в тексте статьи.

Произведем дифференцирование уравнений активного четырехполюсника следующим образом. Продифференцируем обе части уравнения (I) по U_A, а обе части уравнений системы (II) соответственно по $U_{a1}, U_{a2}, \ldots, U_{aN}$. Тогда, принимая во внимание, что последние члены этих уравнений постоянны, и пользуясь определениями динамической проводимости, а также подстановкой

$$\frac{dU_{an}}{dU_{al}} = \frac{dU_{an}}{dU_A} \cdot \frac{dU_A}{dU_{al}},$$

получаем после преобразований:

$$\gamma_{AB} = y_{kAB} - \sum_{n=1}^{N} \frac{dU_{an}}{dU_A} y_{knB}; \quad \text{(VIII)}$$

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dU_{a1}}{dU_A} \gamma_{a1} + \sum_{n=1}^{N} \frac{dU_{an}}{dU_A} y_{kn1} = y_{kA1}, \\ &\frac{dU_{a2}}{dU_A} \gamma_{a2} + \sum_{n=1}^{N} \frac{dU_{an}}{dU_A} y_{kn2} = y_{kA2}, \\ &\frac{dU_{aN}}{dU_A} \gamma_{aN} + \sum_{n=1}^{N} \frac{dU_{an}}{dU_A} y_{knN} = y_{kAN}. \end{aligned}\right\} \quad \text{(IX)}$$

Уравнения (VIII) и (IX) подобны уравнениям (V) и (VI) и отличаются от них только тем, что взамен статических проводимостей нелинейных элементов y_{pn} и напряжений на них U_{pn} подставлены динамические проводимости γ_{an} и напряжения на них U_{an} и взамен отношений $\frac{U_{pn}}{U_A}$ подставлены производные $\frac{dU_{an}}{dU_A}$. Поэтому, решая эту систему уравнений по отношению к неизвестным $\frac{dU_{a1}}{dU_A}, \frac{dU_{a2}}{dU_A}, \ldots, \frac{dU_{aN}}{dU_A}$, мы получим те же функциональные зависимости, что и в (VII):

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dU_{a1}}{dU_A} = \varphi_1(\gamma_{a1}, \gamma_{a2}, \ldots, \gamma_{aN}), \\ &\frac{dU_{a2}}{dU_A} = \varphi_2(\gamma_{a1}, \gamma_{a2}, \ldots, \gamma_{aN}), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &\frac{dU_{aN}}{dU_A} = \varphi_N(\gamma_{a1}, \gamma_{a2}, \ldots, \gamma_{aN}). \end{aligned}\right\} \quad \text{(X)}$$

Подставляя эти значения в уравнение (VIII), получаем зависимость динамической взаимной проводимости контуров A и B активного нелинейного четырехполюсника от динамических проводимостей нелинейных элементов, которая выражается той же функцией (10), что и зависимость между статическими проводимостями пассивного нелинейного четырехполюсника (8).

Если произвести дифференцирование уравнений пассивного четырехполюсника (III) и (IV), то будут получены уравнения, совершенно аналогичные (VIII) и (IX) с той лишь разницей, что вместо индекса a будет стоять индекс p. Следовательно, при решении этих уравнений будет получена функциональная зависимость (9), индентичная (8) и (10). Тем самым доказывается одинаковость функциональной связи между динамическими проводимостями активного или пассивного нелинейного четырехполюсника, с одной стороны, и функциональной связи между статическими проводимостями пассивного нелинейного четырехполюсника, с другой стороны.

Литература

1. Ф. Е. Темников и Р. Р. Харченко. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, 1948.

2. Б. С. Сотсков. Автоматика и телемеханика, № 5, стр. 384, 1948.

[2. 8. 1949]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Измерение малой мощности переменного тока при помощи амперметра

Кандидат техн. наук М. С. МИРЕНСКИЙ

Москва

Излагается метод измерения малой мощности переменного тока при индуктивной нагрузке с помощью амперметра. Предлагаемый метод основан на принципе компенсации реактивного тока нагрузки током надлежаще подобранной емкости.

При лабораторных исследованиях часто требуется измерить небольшую мощность—порядка долей ватта или нескольких ватт. Специальные ваттметры для измерения малых мощностей являются мало распространенными приборами. Существующие другие приборы и приемы для измерения оказываются на деле малопригодными. Особые затруднения возникают в случае необходимости измерить мощность при высокой частоте.

Предлагаемый ниже метод измерения малых мощностей может применяться при индуктивных нагрузках; в особенности при высоких частотах. Идея этого метода основана на принципе резонанса токов и заключается в том, что параллельно установке, потребляемую мощность которой желательно измерить,

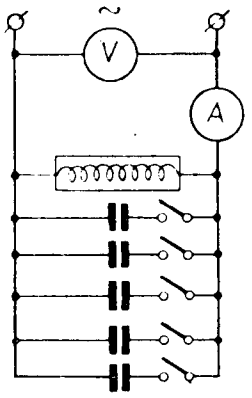

Схема для измерения методом компенсации активной составляющей тока нагрузки.

включается магазин емкостей так, как это показано на рисунке. По мере увеличения включенной емкости ток, отмечаемый амперметром, будет уменьшаться до известного предела. Дальнейшее увеличение емкости приведет к увеличению показаний амперметра. Отмечая минимальные показания амперметра, можно считать, что $I_{мин} = I\cos\varphi$, следовательно, произведение $UI_{мин} = UI\cos\varphi$ даст искомую мощность. Конечно, следует принять во внимание, что измеренная по этому способу мощность несколько больше искомой на величину активных потерь в конденсаторах.

Для оценки соотношения между потерями в конденсаторе и измеряемой активной мощностью приводим следующий расчет:

Ток конденсаторов

$$I_c = U\omega C.$$

Активная составляющая тока конденсаторов

$$I_{ac} = U\omega C \operatorname{tg}\delta.$$

Реактивная составляющая тока нагрузки (при выключенных конденсаторах)

$$I_r = I_a \operatorname{tg}\varphi,$$

где I_a — активная составляющая тока нагрузки;
φ — угол сдвига между вектором тока нагрузки и напряжением U.

Минимальное значение тока, отмечаемое по амперметру, будет иметь место тогда, когда при надлежаще подобранной емкости реактивная составляющая тока нагрузки I_r будет скомпенсирована током конденсатора I_c. Следовательно, можно написать: $I_r = I_c$ или $I_a \operatorname{tg}\varphi = U\omega C$, откуда

$$I_a = \frac{U\omega C}{\operatorname{tg}\varphi}.$$

Затем определяем отношение активной составляющей тока конденсатора I_{ac} к активной составляющей тока нагрузки

$$\frac{I_{ac}}{I_a} = \frac{U\omega C \operatorname{tg}\delta \operatorname{tg}\varphi}{U\omega C},$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

откуда

$$I_{ac} = \operatorname{tg}\delta \operatorname{tg}\varphi I_c. \qquad (1)$$

Очевидно, что процентное значение активной составляющей тока конденсатора к активной составляющей тока нагрузки зависит от $\operatorname{tg}\delta$ и от $\cos\varphi$. Для слюдяных и бумажных конденсаторов эта зависимость, подсчитанная по формуле (1), показана в таблице.

tg δ		cos φ	tg φ	Активная составляющая тока конденсатора в процентах от активной составляющей тока нагрузки	
Слюдяные конденсаторы	Бумажные конденсаторы			Слюдяные конденсаторы	Бумажные конденсаторы
0,0003	0,005	0,01	100	3	50
0,0003	0,005	0,1	10	0,3	5
0,0003	0,005	0,2	4,87	0,15	2,4
0,0003	0,005	0,3	3,18	0,09	1,5
0,0003	0,005	0,4	2,29	0,07	1,15
0,0003	0,005	0,6	1,33	0,04	0,65
0,0003	0,005	0,8	0,75	0,02	0,37
0,0003	0,005	0,95	0,328	0,012	0,16

На основании данных, приведенных в таблице, при $\cos\varphi$, равном 0,01 и выше, активная составляющая тока слюдяных конденсаторов в процентах от активной составляющей тока нагрузки представляет собой незначительную величину, которой можно пренебречь. При значениях $\cos\varphi = 0{,}01$ (что практически не бывает—это соответствует сдвигу почти 90°) активная составляющая тока конденсатора (слюдяного) составляет 3% от активной составляющей тока нагрузки. Этим обстоятельством, если потребуется, пренебрегать не следует, учитывая возникающую из этого ошибку поправочными данными, приложенными к магазину емкостей. Погрешность, могущая возникнуть при пользовании бумажными конденсаторами, значительно выше, чем при слюдяных конденсаторах. Бумажными конденсаторами можно, повидимому, пользоваться при измерениях, где $\cos\varphi = 0{,}3$ и выше.

Для измерения мощности при малых напряжениях или при очень низких частотах могут потребоваться магазины со значительной емкостью. В этом случае может оказаться, что измерение по предложенному способу будет затруднено.

[5. 9. 1949]

◇ ◇ ◇

К АВТОРАМ ЖУРНАЛА

В дополнение к обращению редакции к авторам журнала (см. Электричество, № 4, 1950 г.) редакция сообщает, что 18 мая с. г. на авторской конференции в Москве был обсужден ряд вопросов, связанных с качеством подготовки рукописей для журнала «Электричество», и конференцией были приняты соответствующие решения.

Редакция обращается ко всем авторам журнала с просьбой учесть состоявшийся на конференции обмен мнений и в дальнейшем руководствоваться принятыми на конференции авторов в Москве решениями (см. информацию в разделе «Хроника» настоящего номера, стр. 92).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Работы Б. С. Якоби в области электрических измерений

Член-корр. АН СССР, проф. М. А. ШАТЕЛЕН

Ленинград

Имя русского академика Бориса Семеновича Якоби хорошо известно, как имя изобретателя гальванопластики, пионера в области электромагнитной телеграфии, конструктора первого электродвигателя, получившего применение для движения лодки, и т. п. Меньше знают Якоби, как одного из первых организаторов международной метрологической службы, и еще меньше, как инициативного работника в области электрических измерений, способствовавшего своими работами улучшению методов электрических измерений и совершенствованию электрических измерительных приборов.

Труды Б. С. Якоби, а также его совместные с академиком Э. Х. Ленцом работы, немало способствовали правильному пониманию закона Ома. Ленц и Якоби впервые применили для измерений намагничивающих действий тока способ, основанный на определении подъемной силы электромагнитов, и способ измерения индуктированных токов, получивший впоследствии название «баллистического». Трудами Якоби были созданы первые эталоны предложенных им единиц тока и сопротивления, получившие в свое время широкое распространение. Наконец, настойчивой и длительной работе Б. С. Якоби мы в значительной мере обязаны созданием международной организации, поддерживающей до настоящего времени во всем мире единство мер и весов.

Работая с гальванометрами разных типов, Якоби убедился в необходимости снабжать их успокоителями и разработал масляный успокоитель, получивший широкое распространение и осуществлявшийся затем весьма различными способами. Вместе с Ленцом Якоби работал и над магнитными измерениями; они первые установили связь между намагничением железа током силой намагничивающего тока и числом витков в намагничивающей обмотке.

В известном в свое время немецком курсе физики Вюльпера было отмечено: «Первыми, кто изучал зависимость временных магнитных моментов (в мягком железе) от намагничивающих токов были Ленц и Якоби. Метод, который они применили для измерения магнитных моментов, основан на следующем: когда намагничивают железный стержень посредством окружающей его замкнутой спирали, то в момент намагничивания, как мы покажем в следующей главе (глава об электромагнитной индукции), в спирали возбуждается электрический ток, который длится, пока не будет возбуждено намагничение. Обратно он появляется, когда магнитизм в стержне уничтожается. Мы увидим дальше, что сила индуктируемых токов пропорциональна возбужденному или уничтоженному магнитному моменту. Поэтому, если снабдить стержень кроме намагничивающей спирали еще второй, замкнутой на гальванометр, то наблюденный в гальванометре индукционный ток может нам дать указание на магнитный момент, возбужденный в стержне... Ленц и Якоби его и наблюдали... Вытекающий из исследований Ленца и Якоби закон, по которому временный магнитный момент пропорционален силе намагничивающего тока, был в дальнейшем многократно проверяем и оказывался верным».

Приоритет Якоби и Ленца в исследовании баллистическим методом магнитных свойств железа подтверждают и французские ученые. Маскар и Жубер в своем курсе «Электричество и магнитизм» сообщают: «Первые численные результаты относительно намагничивания мягкого железа принадлежат Якоби и Ленцу. Они применили индукционный метод к исследованию цилиндрического стержня и заключили из своих опытов, что намагничивание пропорционально силе тока». Вывод Ленца и Якоби об этой пропорциональности при дальнейших исследованиях, как известно, не подтвердился полностью, но для условий, в которых делали свои исследования Якоби и Ленц (стержень большого сечения и слабые намагничивающие токи) он был верен. Своими исследованиями Ленц и Якоби показали, что намагничивание пропорционально также числу витков в намагничивающей обмотке, т. е. в сумме, как мы говорим теперь, числу ампервитков.

Ленц и Якоби исследовали также связь между подъемной силой электромагнита и силой намагничивающего тока и первые установили для стержневидных электромагнитов пропорциональность подъемной силы квадрату силы намагничивающего тока.

Таким образом, в области магнитных измерений Якоби вместе с Ленцом были пионерами в применении двух способов определения магнитных свойств тел «индукционного» и «отрывного», получивших затем широкое применение. В частности, индукционный способ был в дальнейшем усовершенствован и применен в своих исследованиях «функции намагничения» А. Г. Столетовым, а затем и Ровландом.

Точным измерениям Якоби придавал особое значение. «Искусство измерения,— говорил он в своем докладе Петербургской Академии наук,— является могущественнейшим оружием, созданным человеческим разумом для проникновения в законы природы и подчинения ее сил нашему господству»...

«...Ни одной точной науки, ни одной прикладной науки, ни одного опыта без измерений! Новые средства измерения знаменуют собой настоящий прогресс!»

Этих новых средств измерения и не только для научных, но и для технических целей и искал Якоби. «В течение моей научной, более чем четверть века продолжавшейся карьеры, заполненной не только научными исследованиями в области электричества и магнитизма, но не в меньшей мере и полезными приложениями этих замечательных сил, приложениями, изо дня в день становящимися более обширными, применению которых мы дали толчок, я имел часто случай говорить себе, что я мог бы сделать гораздо больше, если бы я мог располагать средствами измерений в роде тех, которые я (теперь) предлагаю. Нет никого, кто работал бы на том же поприще, в целях науки или в целях практического применения, кто не был бы вынужден сделать себе такое же признание».

Так писал Якоби (в 1859 г.) в период полного расцвета его научной деятельности.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Характерной особенностью всех работ Якоби, в том числе работ в области электрических измерений, была их целеустремленность и стремление использовать результаты работ для практических целей. Всякий вопрос Якоби рассматривает и с научной, и с технической и с экономической точек зрения. Так было и с гальванопластикой и с электродвигателем и с рядом других работ, в частности, работ по электрическим измерениям. Быть может эта особенность родилась и развилась под влиянием условий, в которых Якоби начал свою ученую деятельность[1]. Первой кафедрой, на которой начал работать Якоби, была кафедра архитектуры в Дерптском университете, на которую он был избран в 1835 г. В Петербургскую Академию наук он был избран в 1839 г. адъюнктом «по части практической механики и теории машин». В 1847 г. он стал уже ординарным академиком «по части технологии и прикладной химии, приспособленной к искусствам и ремеслам», и только в 1865 г., после смерти Э. Х. Ленца, Якоби занял в Академии кафедру физики.

Еще до получения кафедры в Дерпте, Якоби выпустил свои первые труды: «Практические наставления по механике и машиностроению», «Размышление о шоссейных, водных и железных дорогах и о влиянии этих факторов на национальное богатство», а также труд «Об использовании естественных сил природы для нужд человека».

Сообщая в 1834 г. Парижской академии наук о своих работах с электродвигателями, он подчеркивает, что в своем двигателе он осуществляет *применение в механике новой силы*.

Практический подход можно ясно видеть во многих работах Якоби и, в частности, в его работах по электрическим измерениям. Якоби начал эти работы, почувствовав необходимость в точных электрических измерениях при своих исследованиях в области электромагнитных машин и гальванопластики. К тому времени были уже известны некоторые типы гальванометров с подвижными магнитами, была даже разработана теория гальванометров, на основании которой были построены синус-гальванометры (Пуллье) и тангенс-гальванометры (Гогена, Нервандера и др.). Но при разнообразии типов, размеров и конструкции результаты измерений помощью разных гальванометров оказывались несравнимыми. Постоянные гальванометра, т. е. коэффициенты, связывающие силу тока, проходящего через обмотку гальванометра, с величиной угла отклонения подвижного магнита (или синуса или тангенса этого угла), могли теоретически вычисляться только для совершенно определенных конструкций гальванометров, да и то с большим приближением, так как для этого требовалось точное знание горизонтальной составляющей силы земного магнитизма в месте расположения гальванометра, а эту величину точно определить было трудно и часто прямо невозможно.

Было известно одно явление, для которого был установлен закон, связывающий количество электричества, проходящее через электролит, с результатом действия тока — это явление электролиза. Им тоже пытались пользоваться, в частности и для измерения силы тока, но, помимо того, что этот способ измерения был неудобен для практического применения, его применения вызвали ряд недоразумений, связанных с незнанием или неправильным пониманием законов, управляющих электрическим током в цепях.

Явлением электролиза для определения количеств электричества пользовался в 1834 г. Фарадей, установивший основной закон электролиза: «Химическое действие электрического тока прямо пропорционально абсолютному количеству проходящего электричества»[2].

Вольтаметр Фарадея давал возможность измерять количество электричества, прошедшее по какой-либо цепи в определенный промежуток времени, но не давал никаких указаний о силе тока в различные моменты при его изменяющемся токе.

Пользуясь современной терминологией, мы можем сказать, что это был «счетчик количества электричества», а не «амперметр». Между тем, практика требовала прибор, которым можно было бы измерять в определенных единицах в любой момент времени именно силу тока. Пионером в этой работе был академик Якоби.

Приборами для измерения тока могли бы служить, например, известные в то время электромагнитные приборы с подвижной магнитной стрелкой — буссоли, гальванометры, мультипликаторы и т. п. Однако связь между показаниями этих приборов и силой тока, характеризуемой хотя бы электрохимическими действиями, не была еще установлена. Основной работой Якоби в области электрических измерений и была работа, имевшая целью внести определенность в измерения и установить *зависимость между силой тока*, определяемой посредством электролиза, и *отклонением магнитной стрелки гальванометра*, включенного последовательно с прибором, в котором происходит электролиз. Говоря современным языком, Якоби сделал первую попытку градуировать гальванометр при помощи вольтаметра и этим он установил и понятие о градуированном на силу тока гальванометре и метод градуировки, получивший в дальнейшем широчайшее применение.

«Пусть, — пишет Якоби, — i и i_1 будут силами токов, выраженными в электролитических единицах $\varphi(\alpha)$ и $\varphi(\alpha_1)$, силы, которые вызывают отклонения стрелки от положения равновесия. Это силы — пропорциональные определенной функции углов отклонения α и α_1. Мы имеем

$$i : i_1 = \varphi(\alpha) : \varphi(\alpha_1)$$

или

$$i_1 = \frac{i}{\varphi(\alpha)} \times \varphi(\alpha_1) = k\varphi(\alpha_1),$$

где k — есть постоянный коэффициент, равный $\frac{i}{\varphi(\alpha)}$, определяемый опытом... Если закон для какого-нибудь гальванометра выводится теоретически, то электрохимические разложения и служат нам для проверки этого закона и этот гальванометр становится драгоценным инструментом, совершенно необходимым при всех исследованиях, касающихся закона электролиза. Подобный прибор, проверенный на всем протяжении показаний, получает значение нормального прибора, с которым будут весьма легко сравниваться другие гальванометры любой конструкции, для которых требуется установить закон эмпирически. Для этой цели надо только включать гальванометр в одну цепь с нормальным прибором и пропускать через эту цепь токи различной силы, регулируемые агометром, и отмечать отклонения стрелок, соответствующие определенным силам токов, определяемым нормальным прибором».

Свой мемуар, помещенный в 1839 г. в Научном бюллетене Петербургской академии наук, озаглавленный «О химических и магнитных гальванометрах», Якоби начинает словами: «Вскоре после открытия вольтова столба часто пользовались в качестве меры для сравнения действия по силе тока столба, различных по числу или размерам элементов, известными аппаратами для разложения воды, но не приходили ни к какому результату. Только закон Ома познакомил нас с влиянием, которое оказывают различные элементы замкнутой цепи, и с тем, как должно учитываться это влияние». Этот «учет влияния» различных элементов замкнутой цепи, т. е. электродвижущей силы и сопротивления цепи на силу электрического тока и на явления, связанные с прохождением тока по проводнику, и стали первым объектом исследования Якоби в работах по электротермии.

Прежде всего Якоби занялся решением вопроса, как связаны между собой различные проявления электрического тока, которые могут быть применены для измерения тока.

«Многие физики, — пишет Якоби в названном мемуаре, — молча соглашались с тем, что химические, термические и магнитные действия тока пропорциональны друг другу. Насколько мне известно, это не доказано... Это и другие практические соображения побудили меня произвести серию исследований над химическими и магнитными действиями гальванического тока».

Для того чтобы можно было пользоваться химическими и магнитными действиями тока для его измерения, нужно только, по мнению Якоби, «доказать параллелизм обоих действий» и затем для измерений «только наблюдать включенную буссоль, которая перед тем была как-то связана с электролитом». Для доказательства этого параллелизма Якоби произвел множество наблюдений.

[1] Биографические сведения о Б. С. Якоби см. М. И. Радовский „Борис Семенович Якоби", Госэнергоиздат, 1949.

[2] Фарадей „Экспериментальные исследования по электричеству". Перевод под редакцией Т. П. Кравеца. Издание АН СССР, 1947, т. I, серия VII, § 783.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

«В качестве магнитного гальванометра,— пишет Якоби,— я пользовался тангенс-буссолью, построенной по данным Нервандера, в которой сила тока при отклонениях до 60° пропорциональна тангенсу угла отклонения... Водоразлагающий аппарат, которым я пользовался, не представлял из себя ничего своеобразного». Тут Якоби добавляет: «недавно Фарадей в своей седьмой серии воспользовался водоразлагающими аппаратами, которые он называет вольтэлектрометрами». Описывая обстановку опытов, Якоби пишет: «Буссоль и вольтэлектрометр были расположены в цепи друг за другом... Более сильные или более слабые токи производились посредством соответствующего изменения числа пластин».

Электролитическое действие тока характеризовалось объемом гремучего газа, выделявшегося в 1 *мин* и приведенного к 0° и нормальному давлению, выраженному в кубических сантиметрах. Впоследствии Якоби стал характеризовать силу электрического тока количеством выделяемого при электролизе водорода.

Из сопоставления целого ряда данных, сведенных в многочисленные таблицы, Якоби приходит к заключению, что «разложение воды пропорционально измеренной посредством магнитного гальванометра силе тока».

Отсюда Якоби выводит, что «мы можем с уверенностью применять закон, что магнитные и химические действия тока строго пропорциональны друг другу, и что мы можем применять с одинаковым правом для измерения силы тока и магнитные гальванометры, и водоразлагающие аппараты».

Не довольствуясь полученными результатами, Якоби произвел длинный ряд проверочных опытов, заменял вольтов столб различными гальваническими элементами и даже магнито-электрической машиной, так как в то время не было еще общепринято, что во всех этих случаях мы имеем дело с одним и тем же «электричеством», а не с различными «электричествами» (статическим или «обыкновенным», как его называл Фарадей, гальваническим, магнитным и др.). Точно так же вместо тангенс-гальванометра он брал другие гальванометры, в том числе синус-гальванометр Пулье. В результате Якоби пришел к заключению, что вывод его справедлив для всяких электроизмерительных приборов, основанных на принципе взаимодействия токов и магнитов.

Продолжая свои опыты над приборами, пригодными для измерения тока, Якоби от магнитных гальванометров перешел к изучению только что предложенных Вебером электродинамометров (бифилярных и пружинных). Этим приборам он отдавал даже предпочтение перед гальванометрами. Интересно заметить, что тут Якоби вступил в пререкание с самим изобретателем электродинамометра, который был склонен предпочесть для этих измерений магнитный гальванометр. В письме Вебера к Якоби от 30 (18) IV 1857 г., сохранившемся в Архиве Академии наук СССР, Вебер пишет: «Меня очень радует, что Вы признаете важность электродинамического гальванометра в сравнении с магнитным гальванометром. Конечно, принципиально проще измерять силу токов посредством действия токов на токи, чем посредством действия токов на магнит. Практическая причина, в силу которой Вы, мне кажется, склонны отдать предпочтение в качестве нормального прибора электродинамическому гальванометру, связана с независимостью этих измерений от магнитных обсерваторий, от которых нужно было бы получать точные данные о силе земного магнитизма, в абсолютной мере... Но, если приходится считаться с тем, что в условиях, в которых мы находимся, везде действует земной магнитизм... то при всех электродинамических действиях токов на токи нужно учитывать сопутствующее действие земного магнитизма.

Если имеется в виду делать гальванические измерения совершенно независящие от земного магнитизма, то нужно прибегать к воздействиям, оказываемым токами на тела, через которые они проходят, т. е. воздействиям к химическим и тепловым. Если это воздействие нежелательно, то... нельзя усмотреть никаких причин, почему бы не использовать сам (земной) магнитизм, действие которого все равно имеется налицо и не может быть устранено. Вот почему я думаю, что для измерений тока, вообще, магнитные гальванометры будут иметь преимущества перед электрическими».

Как известно, практика показала необходимость применения обоих типов гальванометров «магнитных» и «электродинамических» и установила случаи, когда одни из них имеют преимущество перед другими.

Из цитированного письма Вебера явствует, что он, как и Якоби, признавал основным способом измерения тока способ измерения посредством вольтаметра. Проделав ряд опытов с различными электролитами и различными электродами, в том числе с раствором азотнокислого серебра и с платиновыми электродами, Якоби еще больше укрепился в этом убеждении.

Исходя из убеждения о совершенной необходимости установления единой для всех «единицы силы тока», Якоби и пришел к заключению, что эта единица должна определяться по электролитическому действию тока. Уже в 1847 г. он пишет Поггендорфу: «Насколько было бы интересным и важным, если бы физики в своих гальванических исследованиях пользовались бы для измерений электролитической мерой. Для этого нужно было бы (только), чтобы буссоли были приведены к электролитическим мерам».

Еще определеннее Якоби высказывается по этому вопросу в своем докладе, сделанном Парижской академии наук в 1851 г., в котором он говорит: «Ничто не было бы так желательно как для научных исследований, так и для практических приложений, как иметь гальваническую буссоль, лимб которой был бы разделен не на градусы, а на кратные электролитического разложения, принятого за единицу».

В обширном докладе, сделанном в Петербургской академии наук в 1857 г., Якоби идет еще дальше. В этом докладе, помещенном в Бюллетенях Физико-математического отделения Академии наук за 1858 г., под заглавием «О необходимости выражать силу электрических токов и сопротивлений в общепринятых единицах», Якоби говорит: «Если сила тока измерена посредством электрохимического разложения азотно-кислого серебра или посредством разложения другого какого-нибудь вещества, то нет ничего легче, как привести полученные результаты к произвольной мере, которую мы пожелаем принять в качестве нормальной единицы... Какова бы ни была эта произвольная единица, желательно, чтобы она была установлена с общего согласия и поддержана авторитетом ученых корпораций, чтобы в это дело не вмешивалось бы ни национальное самолюбие и себялюбие отдельных лиц, чтобы не было бы отдельной электрической единицы русской, французской, английской или, по образцу термометрических шкал, единицы Вебера, Пулье, Якоби и др.».

В этих строках ясно видно *убеждение Якоби в необходимости международных единиц измерений*, которое он с таким упорством отстаивал при обсуждении вопроса об организации международной службы мер и весов.

В качестве единицы силы электрического тока Якоби предложил принять силу тока, при которой из разлагаемой между платиновыми электродами воды выделяется в 1 мин. 1 *см*³ гремучего газа (приведенного к нормальному давлению при температуре 0°). В дальнейшем было предложено определять эту единицу не по количеству гремучего газа, а по количеству выделенного водорода.

Впоследствии и сам Якоби предложил определять единицу силы электрического тока по количеству выделенного серебра из раствора азотнокислого серебра, т. е. на том способе определения этой единицы, который был установлен почти полвека спустя, в 1893 г. на Всемирном электротехническом конгрессе в Чикаго, который был принят во всем мире и действовал в качестве стандартного вплоть до 1948 г., когда была введена система «абсолютных практических единиц».

Из сказанного явствует, что *приоритет в установлении первой единицы силы электрического тока*, предложенной для всеобщего применения, *принадлежит русскому ученому Борису Семеновичу Якоби*. К этому нужно прибавить, что способ, предложенный для осуществления этой единицы, был настолько совершенен, что он спустя почти четыре десятка лет, был вновь предложен уже международной организацией и оставался стандартным в течение 55 лет, пока прогресс в технике электрических измерений не позволил заменить его другим, более совершенным.

Борису Семеновичу Якоби принадлежит и *приоритет введения в технику измерения приборов с градуированной шкалой*, т. е. амперметров, так как стрелочный гальвано-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

метр с лимбом, т. е. со шкалой, градуированной не на градусы, а на единицы тока, и есть тот прибор, который впоследствии и получил название амперметра.

Вопросом об измерении силы электрического тока не ограничивались работы академика Якоби по электрическим измерениям. Ему же принадлежит ряд исследований, касающихся измерений электрических сопротивлений проводников, имеющих еще большее значение, чем работы по измерению электрического тока, и приведшие Якоби также к созданию единицы сопротивления и осуществлению эталона этой единицы, долгое время имевшего среди физиков Европы наибольшее распространение.

Нельзя точно установить, когда Якоби начал специально заниматься вопросом об измерении сопротивлений проводников. Вероятнее всего, что он начал с разработки приборов, которые он называл «регуляторами» и которые служили Якоби для поддержания постоянства электрического тока в цепи. Устраивал он эти регуляторы и «с жидким сопротивлением», и «с твердым сопротивлением». Работая с этими регуляторами, Якоби и пришел к мысли использовать их не только для регулировки силы электрического тока, но и для измерений сопротивления проводов.

Основу предложенного им **метода измерения сопротивлений** Якоби излагает так: «Будем придерживаться простого и очевидного факта, что два провода имеют одинаковое сопротивление, если при их поочередном введении в одну и ту же цепь сила тока никоим образом не изменяется». Отсюда и метод измерения посредством замены измеряемого сопротивления другим известным, сопротивление которого может быть плавно изменяемо. На этом принципе и был построен Якоби прибор, получивший широкую известность под именем «*Агометра Якоби*», показанный им впервые в заседании Петербургской академии наук 6 мая (24 апреля) 1840 г. Агометр Якоби в основном состоял из мраморного цилиндра, на котором была навита винтом нейзильберная проволока. На проволоку опирался контакт в виде круглого колесика, который при вращении мраморного цилиндра перемещался вдоль его оси. Один конец навитой проволоки присоединялся к одному концу цепи, другой конец которой присоединялся к подвижному контакту (колесику). При вращении цилиндра таким образом в цепь вводилось большее или меньшее число витков намотанной на мраморный цилиндр проволоки. По этому числу и можно было судить о величине введенного в цепь сопротивления. Как видно, «агометр Якоби» был прототипом целого ряда реостатов, изготовлявшихся затем различными конструкторами в течение многих лет. Еще недавно в физических лабораториях был очень распространен прибор для измерения сопротивления жидкостей, снабженный реостатом, совершенно подобным предложенному Якоби. Почти одновременно с Якоби, но после него, такие же приборы под названиями «реостат» и «реохорд» были предложены Витстоном и Поггендорфом. Но оба они в употреблении были менее удобны, чем «агометр Якоби».

В том, что агометр Якоби был изобретен раньше реостата Витстона, мог убедиться сам Витстон при свидании с Якоби при проезде последнего через Лондон. Якоби с юмором описывает этот инцидент в письме к своей жене, сохранившемся в архиве Академии наук. «Витстон меня очень заинтересовал,— писал Якоби —...Он знает теорию Ома и вычисляет по ней, но по-моему неправильно. После того, как он показал мне массу практических вещей, он дошел, наконец, до своего новейшего прибора, относительно которого он утверждает, что это вершина достижения и что при его помощи можно с величайшею легкостью разрешить все реометрические вопросы. В конце концов он вытащил прибор, но с условием, что я не сделаю ничего виденного достоянием гласности. Я, конечно, полон нетерпения. Шкаф открывается и, о сюрприз! появляется мой регулятор тока. Какое-то наитие заставило меня взять с собою оттиск описания моего прибора и случайно сунуть его в карман. М-р Витстон был немало смущен, когда я показал ему чертеж... В общем Витстон очень талантливая голова, которая, однако, еще нуждается в известной школе, прежде чем он сможет себе позволить входить в тонкости реометрии».

Работая именно над «тонкими вопросами реометрии», Якоби постепенно вводил в свой агометр ряд улучшений. Борясь особенно с изменчивостью сопротивления контакта между катящимся колесиком и проволокой на мраморном цилиндре, Якоби перешел к ртутному контакту и затем сконструировал чистортутный реостат.

Работая со своими агометрами, или, как он их называл иногда, «вольтагометрами», Якоби выработал ряд положений, которыми обусловливается точность измерений, например необходимость учитывать температуру, необходимость применять для измерений возможно слабые токи во избежание нагревания проводников и появления термоэлектрических э. д. с. и ряд других.

Агометры Якоби были в свое время наиболее совершенными приборами этого рода и высоко расценивались не только в России. Вот, что, например, сказано об агометре Якоби в уже цитированном выше, весьма распространенном в конце прошлого столетия курсе «Электричество и магнитизм» Маскара и Жубера: «Реостат Якоби представляет преимущества перед Поггендорфским... В нем избегается деформация проволочки и точка контакта определяется более точно».

Работая над своим методом определения сопротивлений, Якоби изучал попутно свойства известных тогда гальванометров, влияние на их показания земного магнитного поля, а также изучал некоторые другие методы измерения сопротивлений, например, метод дифференциального гальванометра, для которого он разработал оригинальную «дифференциальную буссоль», и давал им критическую оценку. Он также разрабатывал метод измерения, аналогичный по характеру с мостовой схемой.

Свои методы измерений Якоби применял для практических целей в условиях, сильно отличавшихся от лабораторных, например для измерения сопротивления воздушных и подземных проводников строившихся им телеграфных линий.

Работами Якоби вопрос измерения сопротивлений проводников был сильно продвинут вперед. Самого Якоби эти работы убедили в необходимости иметь определенную, общепринятую единицу сопротивления и, как и в случае с единицей силы тока, Якоби повел горячую пропаганду своей идеи и, не ограничиваясь словесной пропагандой, предложил свою единицу сопротивления и изготовил эталон этой единицы.

«Одним из наиболее важных вопросов гальванометрии,— пишет Якоби в своем докладе Петербургской академии наук, сделанном в 1857 г.,— является установление единицы, которой будут измеряться сопротивления... Средства наблюдения, которыми мы располагаем в настоящее время, позволяют выполнить эти измерения со всей желаемой точностью... Возьмем какую-нибудь проволоку, предохраним ее насколько возможно от всякого внешнего влияния, будем сохранять ее с той же тщательностью, которую мы вкладываем в хранение нормальных мер, сделаем ее, наконец, доступной для тех, кто захочет снять с нее копии — вот наш нормальный эталон, к которому ныне будут приводиться непосредственно или посредственно все провода, сопротивление которых надо будет узнать».

Это свое предложение Якоби и осуществил в 1848 г., приготовив свои эталоны из медной проволоки однородного сечения длиной 25 фут. (7,61975 *м*) и весом 345 гран (22,4932 *г*). Копии своего эталона Якоби послал за границу некоторым физикам, с которыми он находился в переписке, в частности, Веберу, Поггендорфу, Марие-Деви, Делариву и др. Сообщения о произведенных этими лицами сравнениях единицы можно найти в письмах Вебера и Поггендорфа к Якоби, сохранившихся в Архиве Академии наук СССР. В частности, Вебер произвел сравнение единицы Якоби со своей «абсолютной единицей» и определил ее величину равной 0,5405 своей единицы. Вот что писал Якоби о своем начинании и о предложенной Вебером «абсолютной единице».

«Вот уже восемь лет, как я по своему побуждению сделал слабую попытку в отношении введения подсобной единицы измерения, попытку продолжить которую мне не позволили другие мои занятия, но которая в свое время была принята с готовностью многими выдающимися учеными. Известно, что в результате этой попытки Вебер сделал предложение, принципы которого он изложил в одном весьма ученом мемуаре, а именно предложение о приведении меры сопротивления или, по крайней мере, нормального эталона, к абсолютной мере. Мы не можем согласиться с этим предложением, которое ни коим образом не осуществляет цели, которую мы имеем в виду.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Кроме того это предложение основано на законе Ома, который в данном случае по некоторым причинам лучше оставить в стороне. ...сопротивление в смысле Вебера имеет своим выражением дробь, числителем которой является электродвижущая сила, а знаменателем — сила тока, причем силы выражены в абсолютной мере. Научное значение этой меры мы никоим образом не оспариваем, но использование ее встречает много практических затруднений. Будем лучше придерживаться простого и очевидного факта, что два провода имеют одинаковое сопротивление, если при поочередном введении их в одну и ту же цепь сила тока в цепи никоим образом не изменяется».

В своем мнении Якоби оказался прав. Как известно, в течение многих лет по решениям целого ряда международных конгрессов единица сопротивления осуществлялась в виде столба ртути однородного сечения, определенной длины и определенной массы, а для практических целей изготовлялись проволочные образцовые катушки. Образцы единицы Якоби, которые он рассылал, были изготовлены с большей тщательностью из проволок чистой меди, залитых изолирующей массой и помещенных в специальные ящики. С этих образцов за границей было изготовлено лучшими мастерами разных лабораторий много копий.

В 1857 г. Якоби демонстрировал нечто в роде *«магазина сопротивлений»*. Это был ящик, содержавший 44 катушки, из них на 11 было намотано по 4 дюйма серебряной проволоки 0,007 дюйма толщиной (0,1 *мм*), на 11 по 40 дюймов и на 11 по 400 дюймов той же проволоки. Все катушки были залиты изолирующим составом. О этим «магазином» Якоби при измерении соединял последовательно свой ртутный агометр, в котором сопротивление могло быть изменяемо плавно. Этот агометр, по словам Якоби, служил при измерениях ноннусом (или верньером).

В течение многих лет Якоби внимательно следил за изменениями сопротивлений образцов, как изготовленных им самим, так и полученных из-за границы, и сам систематически производил их сравнение. О результатах этих сравнений за период с 1846 до 1858 г. Якоби докладывал Академии наук в 1859 г.

«Эта тяжелая работа, — говорит Якоби,—охватила собой измерение 88 сопротивлений, сумма которых равна сопротивлению платиновой проволоки, толщиною в 1 миллиметр и длиною почти в 42 километра или сопротивлению 18 500 введенным мною единицам сопротивления, которые получают все более и более широкое признание со стороны ученых»... «Наблюдения, сделанные над небольшими сопротивлениями, согласуются между собою до третьего десятичного знака. Для сопротивлений в тысячу раз больших может быть гарантирован пятый десятичный знак... Согласованность измерений рассеивает опасения, что проводимость проволок может подвергнуться от времени и употребления изменению, которое превзошло бы пределы, допустимые настоящим состоянием науки».

Изучая работы Якоби по измерению сопротивлений и сопоставляя их с работами, выполнявшимися за границей, необходимо признать, что Якоби в этом вопросе и особенно в вопросе об установлении единицы сопротивления и ее практическом осуществлении также принадлежит мировой приоритет.

Интересно отметить, что в этом случае, как и во многих других, например при обсуждении вопроса об эталоне метра, Якоби всегда высказывался против увлечения так называемыми «естественными» эталонами, доказывая, что повторные измерения величин, служащих основанием для «естественных» эталонов, дают неизбежно различные результаты.

Борясь непрерывно за установление общих для всех стран единиц измерения, Якоби, однако, добился осуществления своих стремлений только в отношении мер длины и массы. Потребовалось много лет для того, чтобы опять-таки в значительной степени по инициативе и по настоянию советских ученых, начата была работа по установлению действительного мирового единства в электрических, магнитных и световых единицах.

Это единство было достигнуто благодаря трудам международных метрологических организаций, образовавшихся в значительной мере вследствие инициативной и упорной работы академика Якоби. «Метрическая конвенция» была подписана в 1875 г. Б. С. Якоби не дожил до этой даты, но тем не менее метрическая конвенция обязана своим появлением главным образом именно трудам академика Якоби, который на протяжении многих лет работал над созданием международной метрологической организации по мерам и весам [3]. Первоначально международные метрологические органы работали над созданием единства только мер длины и массы. Затем в круг ведения вошли тепловые измерения. Попытки русского академика Э. Х. Ленца включить в этот круг и электрические единицы успеха не имели. Многим позже, благодаря в значительной мере настойчивости советских метрологов, эта цель была достигнута, и при Международном комитете мер и весов был организован особый Консультативный комитет по электричеству, организовавший работу по установлению международного единства в электрических измерениях. Несколько позднее, уже по инициативе представителя СССР при названном Комитете был организован Консультативный комитет по фотометрии, начавший работу над единством световых единиц и их эталонов. Работа эта Комитетом закончилась в 1948 г. введением новой абсолютной практической системы электрических единиц и новых световых единиц.

Таким образом, осуществилось желание Якоби, чтобы не было французских, английских или немецких единиц или чтобы не было систем единиц Вебера, Пуллье, Якоби, но чтобы осуществилась идея единой международной системы и электрических единиц. Начало этому осуществлению положено было трудами Б. С. Якоби; именно он был инициатором той огромного значения работы, которую выполнили метрологи всего мира, в частности, наши советские метрологи, создавшие в Союзе ССР первоклассные эталоны абсолютных единиц силы электрического тока и индукции, а также интегрального излучателя этого нового эталона силы света. Эти первоклассные эталоны хранятся теперь во Всесоюзном научно-исследовательском метрологическом институте, носящем имя Д. И. Менделеева (бывшей Главной палате мер и весов), и служат для поддержания единства показаний всех электрических измерительных приборов в СССР.

[3] Подробности о работе Б. С. Якоби и других русских академиков см. „Из истории метрологии в России" М. А Шателена, в книге „Вопросы истории отечественной науки". Изд. Академии наук СССР 1949.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

По страницам технических журналов

МНОГОСКОРОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ДЛЯ СТАНКОСТРОЕНИЯ

Наиболее простым способом изменения скорости в асинхронных двигателях является изменение числа полюсов. Такие многоскоростные двигатели имеют большое значение для станков, особенно там, где можно ограничиться тремя или четырьмя скоростями при числах оборотов шпинделя, равных числам оборотов двигателя.

Основные показатели этих многоскоростных двигателей приведены в таблице.

Конструктивно статорная обмотка представляет собой обычную двухслойную обмотку, секционированную на отдельные части с выводами на переключатель. Особенность разработанных схем состоит в оригинальных комбинациях частей статорной обмотки, чем до предела сокращено число выводов на переключатель полюсов.

Электродвигатель		Мощность, *квт*	Обороты,	Ток, *а*	cos φ	К. п. д., %	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	Число выводов на переключатель
Число скоростей	Тип									
2	Т-41/4-2	1,4/1,7	1 400/2 800	3,5/4,1	0,82/0,9	74/70	2,0/2,4	2,1/2,4	4,6/4,8	6
2	Т-42/4-2	2,4/2,7	1 400/2 800	5,7/6,6	0,85/0,9	76/72	2,0/2,2	2,1/2,3	4,7/4,9	6
2	Т-42/8-4	0,5/0,9	700/1 400	2,3/2,8	0,73/0,9	52/66	1,7/1,4	1,8/1,5	2,8/3,6	6
3	Т-42/6-4-2	1,1/1,6/1,7	910/1 350/2 750	3,4/3,3/3,8	0,70/0,89/0,91	70/63/74	1,8/1,6/1,5	1,8/1,7/1,6	3,6/3,2/3,9	13
3	Т-42/8-4-2	0,5/1,2/1,5	700/1 400/2 750	2,2/2,9/2,9	0,76/0,84/0,95	57/77/81	1,4/2,2/2,2	2,0/2,2/2,2	3,2/5,4/5,1	9
3	Т-42/8-6-4	0,5/0,6/0,9	700/900/1 400	2,4/2,1/2,6	0,6/0,82/0,89	52/52/65	1,4/1,3/1,6	1,8/1,5/1,9	2,9/2,9/4,0	18
4	Т-42/8-6-4-2	0,5/0,6/0,8/1,0	700/900/1 400/2 800	2,4/2,0/2,2/2,5	0,6/0,84/0,9/0,95	52/55/58/60	1,5/1,2/1,6/1,0	1,7/1,4/1,7/2,0	2,5/2,5/3,5/4,2	21

Энергетическим институтом Министерства станкостроения (ЭНИМС) разработана единая серия Т многоскоростных двигателей мощностью 1—10 *квт*, по своим габаритам и установочным размерам соответствующая двигателям МЭП серии А. Для всех типоразмеров предусмотрены исполнения: горизонтальное со станиной на лапах; вертикальное с фланцевым щитом и станиной без лап; вертикальное с фланцевым щитом и валом вниз; пакеты статора и роторы для встройки в станки.

Электрические модификации предусматривают двигатели с повышенным скольжением и с большим пусковым моментом для повторно кратковременного режима работы.

Разработанные схемы применимы для переделки обычных односкоростных двигателей (Урал, АД, МА и др.) в многоскоростные, что проверено на практике.

Для переключения скоростей разработан барабанный переключатель типа БПЗ на 500 *в*, 10 *а*.

Основные характеристики многоскоростных электродвигателей ничем не отличаются от обычных односкоростных электродвигателей. Перегрев обмотки статора остается в пределах 55 ÷ 60° С, что полностью соответствует ГОСТ 183-41.

(Станки и инструмент, № 4, 1950, А. М. Харитонов)

ЗА РУБЕЖОМ

ТЕПЛОВОЙ АВТОМАТ ДЛЯ САМОЛЕТНОГО ГЕНЕРАТОРА

Короткие замыкания в самолетной сети постоянного тока напряжением 28 *в* обычно быстро самоликвидируются вследствие выгорания проводов в месте повреждения. Однако в некоторых случаях возможны опасные длительные короткие замыкания.

Для защиты генераторов от таких коротких замыканий в сети электроснабжения многомоторных самолетов сконструирован тепловой автомат. Контакты автомата в цепи якоря генератора разрывают ток до 10 000 *а* и выдерживают длительную нагрузку током 400 *а* при напряжении 30 *в*. Автомат снабжен контактами для разрыва цепи возбуждения генератора. Автомат действует при изгибе встроенной биметаллической пластинки, подогреваемой током генератора. Характеристика автомата мало зависит от окружающей температуры при изменении ее в пределах от —50° С до +70° С. При температуре окружающей среды 25° С и токах от 200 до 10 000 *а* выдержка времени соответственно изменяется от 20 *мин* до 0,15 *сек*. Автомат действует также при обратном токе.

Для обеспечения надежной работы на больших высотах автомат помещен в герметический кожух, заполненный сухим азотом под давлением 200 *гр/см²*. Для контроля за влажностью азота в кожухе имеется силикагелевый индикатор, за которым можно наблюдать в специальное окно. Контактор рассчитан на вибрацию при частоте 550 *пер/сек.* и ускорение 98,1 *м/сек²*.

(El. Engineering, № 2, 1950, C. E. Gognier, E. L. Caustin)

Инж. А. Б. ТИМОФЕЕВ

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Дискуссии

Правила устройства электротехнических установок[1]

От Оргкомитета (ВНИТОЭ) по подготовке Всесоюзного совещания для обсуждения Правил устройства электротехнических установок

В секциях Оргкомитета рассмотрены и обработаны отзывы научных, проектных, монтажных организаций и производственных предприятий Советского Союза по всем разделам Правил устройства электротехнических установок (всего более 100 отзывов по разделам Правил). Ниже помещаются составленные на основе рассмотрения указанных отзывов итоговые замечания отдельных секций по разделам Правил.

Оргкомитет обращается к инженерам и техникам с просьбой сообщить свои предложения по сводным замечаниям секций. Предложения следует направлять по адресу: Ленинград, 25, Стремянная, д. 10, ВНИТОЭ — оргкомитету по Правилам.

Председатель Оргкомитета инж. В. С. ЯСЕВИЧ

Инж. С. А. КРАСНОГОРОДЦЕВ

Член Оргкомитета ВНИТОЭ

О структуре Правил. «Правила устройства электротехнических установок» имеют структурные недостатки, затрудняющие пользование ими в практических условиях.

Деление Правил на разделы носит случайный и нечеткий характер. Если Правила содержат «Указания по проектированию электрических систем» (стр. 5—11), то естественно стремление найти здесь и разделы с указаниями по проектированию электроснабжения промышленных предприятий, электроснабжения населенных пунктов, осветительных установок, распределительных устройств и т. д., но таких разделов, однако, в изданном проекте Правил нет.

Если Правила содержат раздел «Электродвигатели и относящиеся к ним аппараты» (стр. 83—87), то, очевидно, следовало бы иметь и разделы, посвященные генераторам, трансформаторам и другому оборудованию, но они в Правилах также отсутствуют. Наименование данного раздела не соответствует содержанию, так как о собственно двигателях здесь ничего не сказано, кроме того, что они должны быть снабжены табличками (§ 2) и окрашены (§ 7). Далее в Правилах есть раздел «Электромашинные залы» (стр. 75—79), в то же самое время отсутствуют разделы «аккумуляторные помещения», «трансформаторные помещения» и т. д. Наконец, если в Правилах есть разделы, посвященные электрооборудованию взрывоопасных и пожароопасных помещений, то справедливо было бы посвятить особые разделы электрооборудованию помещений с едкими парами, пыльных, с повышенной влажностью, тем более, что по этим помещениям имеется ряд специфических требований, что не отвергают и отдельные параграфы Правил (стр. 115, § 31; стр. 100, § 17 и т. д.).

Многие разделы содержат пункты, устанавливающие произвольные пределы применения изложенных в разделе указаний. Так, раздел «Указания по проектированию электрических систем» применяется к сетям свыше 1 000 *в* (стр. 5, § 4) и ко всем вновь сооружаемым, реконструируемым и расширяемым системам (§ 5); раздел «Электроснабжение промышленных предприятий» ограничен «системами электроснабжения» при установленной мощности свыше 1 000 *квт* (стр. 15, § 1); раздел «Электродвигатели» относится лишь к стационарным установкам (стр. 83, § 1); раздел «Промышленные преобразовательные подстанции» относится лишь к ртутно-выпрямительным подстанциям с металлическими ртутными выпрямителями и только для питания промышленных потребителей (стр. 47, § 1); раздел «Осветительные установки» не распространяется на «осветительные установки театров, кино, подземных выработок, судов, поездов и т. п.» (стр. 97, § 1) и т. д.

У каждого ознакомившегося с содержанием Правил, несомненно, возникнут следующие вопросы: можно ли распространить указания раздела «Электроснабжение промышленных предприятий», например, на горное предприятие? Где можно найти указания по электроснабжению, пусть промышленного предприятия, но с установленной мощностью 800—900 *квт*? Какие еще установки подразумеваются под «и т. п.» в § 1 (стр. 93) раздела «Осветительные установки»? Каким особым требованиям должны удовлетворять установки с металлическими ртутными выпрямителями, питающими непромышленных потребителей (трамвай, радиостанция и т. п.) и почему для таких установок нужны особые указания? Распространяются ли требования, например, раздела «проводки» на вновь сооружаемые и реконструируемые установки?

Содержание отдельных разделов не имеет необходимой цельности и законченности, а зачастую является набором указаний, хотя и ценных, но размещенных по какой-то неясной читателю системе. Так, требования учета перспективы содержатся лишь в разделе «Указания по проектированию электрических систем» и нигде более; определение «электрическая сеть» дано в разделе «Указания по проектированию электрических систем», а определение «источник питания» в разделе «Электроснабжение промышленных предприятий». В разделе «Осветительные установки» в подразделе «Определения» (стр. 97, § 2, 3 и 4) включено описание различий систем освещения, видов освещения, типов осветительных арматур, а по существу эти описания не являются определениями и было бы правильнее здесь в первую очередь определить, что такое система и что такое вид освещения. К разделу «Воздушные линии электропередачи напряжения выше 1 000 *в*» приложен расчет фундаментов, но в то же самое время, каких-либо расчетов не приложено к разделам «Заземления», «Осветительные установки» и др. и нет даже механического расчета проводов и опор по тому же разделу «Воздушные линии». В разделе «Электромашинные залы» помещены указания, не имеющие отношения к залам вообще (стр. 78, § 24, 25 и 26); в разделе «Электродвигатели» (стр. 83—87) имеется подраздел «Защита электродвигателей» (§ 24—31), но аналогичного подраздела нет в таких разделах, как «Статические конденсаторы», «Аккумуляторные батареи» и пр.

К числу дефектов должно отнести также отсутствие нумерации разделов и различное наименование одних и тех же понятий (указания — правила, установка — устройство и пр).

Примеров, иллюстрирующих недостаточную предварительную проработку Правил и отсутствие единой целенаправленности в работе многочисленных авторов их, можно привести значительно больше. Сказанного, по нашему мнению, вполне достаточно, чтобы прийти к выводу о необходимости серьезной редакционной переработки изданных Правил.

---

[1] Обращение редакции к читателям в связи с обсуждением Правил напечатано в № 11, стр. 96, 1949. Выступления по дискуссии см. Электричество, № 12, 1949 и № 3, 4, 6, 8, 1950.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Чтобы придать Правилам нужную направленность, увеличить их практическую ценность и общедоступность, требуется: 1) разработать общую структуру Правил, составив подробный перечень разделов с наименованием, максимально определяющим содержание; 2) определить содержание каждого раздела, порядок изложения указаний и даже стиль изложения; 3) дать определения таким основным понятиям как «установка», «устройство», «коммутация», «система» и др.

В этом направлении Оргкомитетом разработана, по материалам инж. В. С. Ясевича, классификация Правил, содержащая наименование разделов и подразделов. Эта классификация могла бы быть использована как основа при разработке общей структуры Правил. При уточнении Правил следует исходить из понимания под электротехнической установкой совокупности электрического оборудования (машин, аппаратов, приемников) и токопроводов, установленных в определенном порядке, связанных друг с другом по определенной схеме и выполняющей определенное технологическое назначение в общей схеме «производство — потребление» электрической энергии. Совокупность электротехнических установок, в свою очередь связанных друг с другом токопроводами по определенной схеме, понимается как электротехническое устройство. Эти определения может быть несколько условны, но все же они должны быть сформулированы, как руководящие при разработке структуры. С точки зрения такого понимания устройством можно считать воздушную линию, а установкой, скажем, совокупность электродвигателя с принадлежащей к нему аппаратурой, но нельзя считать установкой «электромашинные залы», «штепсельные соединения» и т. д., как это принято в изданных Правилах.

Из приведенных определений, ясно, что весь электротехнический комплекс «генератор-приемник» не может быть разбит на установки произвольно. Так, нельзя назвать «установкой» комплекс колхозной электрификации, состоящий из небольшой электростанции, проводок и приемников.

Каждый раздел Правил, касаясь определенного вопроса, той или иной установки или устройства, должен быть исчерпывающим как для общих случаев, так и частных, т. е. для различных производственных условий, в различных помещениях и т. д. Таким образом, раздел «Установки с электродвигателями» должен быть построен примерно по следующей схеме: а) общие указания по установке двигателей; б) указания по установке двигателей различных типов и для различных производственных условий (торфяная промышленность, сельское хозяйство, горная промышленность, лаборатории, мастерские, подъемные и крановые установки, временные установки, передвижные установки, судовые установки и т. д.) и в различных помещениях (жилые дома, кино, театры и клубы, в помещениях особо сырых, пожароопасных, взрывоопасных, с проводящей пылью, с едкими парами и т. д.).

Правила рассчитываются на длительный срок службы, а потому они не должны содержать указаний переходящего, не установившегося характера, дублировать ГОСТ или ПТЭ, имеющие меньший срок службы, чем Правила. С этой точки зрения нужно считать неуместным включение в Правила таблиц допускаемых напряжений для заклепок, болтов, сварных швов (стр. 156—157, § 52, 54), а также перечня технической документации для воздушных линий электропередачи (стр. 190, § 149), и др. Следует иметь в виду, что действующие ПТЭ также не удовлетворяют требованиям, изложенным выше, и зачастую содержат указания, относящиеся не к эксплоатации, а именно к устройству электротехнических установок.

В то же время Правила не должны игнорировать современных достижений техники. Между тем, в изданных Правилах нет, например, никаких указаний по борьбе с радиопомехами от установок сильного тока, по установке ламповых выпрямителей промышленного типа, по устройству линий передачи «два провода — земля» и т. д.

Выполнение изложенных выше требований значительно осложняет работы по составлению и редактированию Правил, но нам кажется неоспоримым, что при проработке структуры, а затем и при составлении Правил надлежит руководствоваться только интересами и удобствами пользующихся ими.

Инж. М. К. ХАРЧЕВ

Председатель секции электроснабжения

Основные замечания и пожелания, которые следует учесть при выработке окончательной редакции раздела: «*Указания по проектированию электрических систем*», таковы.

1. **Определения и область применения.** § 1. Следует уточнить редакцию этого параграфа, имея в виду, что энергетическая система должна определяться как совокупность электростанций, подстанций и приемников электрической и тепловой энергии, связанных между собой линиями электрических и тепловых сетей.

§ 3. Этот параграф следует сформулировать так: «Электрическими сетями называются части электрической системы, состоящие из подстанций и линий. Электрические сети различаются по напряжению, роду тока и выполнению (воздушные и кабельные)».

§ 4 и 5. Эти параграфы лучше объединить в следующей редакции: «Настоящие указания относятся к вновь сооружаемым, реконструируемым и расширяемым электрическим системам с сетями с номинальным напряжением выше 1 *кв*.

§ 6. Этот параграф следовало бы исключить и кроме того данную главу дополнить определениями для линий: магистральных, тупиковых, распределительных, ответвлений (отпаек) и др. Следовало бы также дать общее определение источников питания и частное определение независимого источника питания (последние определения можно перенести из раздела Правил «Электроснабжение промышленных предприятий»).

2. **Основные положения проектирования сетей электрических систем.** § 8. Для энергосистем, имеющих значительную мощность гидроэлектростанций, необходимо дополнительное указание о гидрологических условиях, при которых должно быть обеспечено наличие резерва не менее 10%.

Такой резерв должен быть обеспечен, повидимому, в условиях маловодного года (90% обеспеченности).

§ 9. Вопрос о выборе источников покрытия реактивной нагрузки следует значительно расширить и дополнить. Правильнее исходить из следующего основного положения: статические конденсаторы и синхронные компенсаторы, устанавливаемые в качестве источников покрытия реактивной нагрузки или для снижения потерь в сети, могут быть использованы и для целей регулирования напряжения; при этом должно быть в каждом отдельном случае проверено, к каким дополнительным потерям приводит работа этих устройств по вынужденному графику.

Здесь же можно указать, что рекомендуется широкое применение статических конденсаторов в потребительских системах, применение же синхронных компенсаторов мощностью менее 7 500 *ква* не рекомендуется (в отличие от § 32, в котором нижний предел мощности указан в 5 000 *ква*).

§ 10. Целесообразность учета плановых ремонтов при рассмотрении нормальных эксплоатационных режимов представляется сомнительной; перспективная экономичность работы определяется настолько неточными цифрами, что уточнение, создаваемое учетом плановых ремонтов, повидимому, лишено смысла.

§ 11. Предлагаемая данным параграфом сложная система учета аварийных режимов в зависимости от числа установленных машин в системе вряд ли может быть признана приемлемой. Представляется, что для системы мощностью до 200—250 *мгвт* следует исходить из возможности выхода из строя одного наиболее крупного агрегата и для систем более мощных — из возможности выхода из строя нескольких машин суммарной мощностью не более 10—15% от установленной мощности машин системы

§ 12 желательно дополнить указанием о требуемой величине коэффициента запаса статической устойчивости в нормальных и послеаварийных режимах.

§ 13. В числе мероприятий для повышения надежности электроснабжения следует дополнительно указать о применении автоматического повторного включения: трехфазного, пофазного, о длительности работы на двух фазах, о применении автоматического ввода резерва, использовании современных типов релейной защиты, а также повышении грозоупорности линий.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

§ 14. Классификация по степени ответственности электроснабжения нагрузок потребителей приводится также и в другом разделе Правил («Электроснабжение промышленных предприятий») и при этом в несколько отличной редакции. Следует редакцию соответственных параграфов привести к единообразию. Наличие повторений в различных разделах Правил указывает на желательность создания общего раздела Правил. Этот параграф во всяком случае лучше было бы перенести в следующую главу, объединив его с § 18.

Данную главу следует дополнить указаниями и рекомендациями по режиму заземления нейтрали в сетях различных напряжений, особенно если иметь в виду, что имеются различные точки зрения на то, должны ли сети напряжением 110 *кв* и выше работать с наглухо заземленной нейтралью или с дугогасящими катушками. Имеются также различные точки зрения по вопросу о местоположении и числе подлежащих заземлению точек.

3. Коммутация электрических сетей. Данную главу рекомендуется объединить в общую главу с предыдущей, так как содержание обеих этих глав касается основных положений проектирования электрических систем.

§ 18. Как уже указывалось выше, этот параграф следует объединить с § 14 и развить его путем добавления о том, что нагрузки первой категории должны быть обеспечены питанием не менее чем от двух независимых источников питания, а для нагрузок третьей категории может быть широко применен подвижной или складской резерв оборудования.

§ 19. В связи с замечаниями по § 13 данный параграф следует исключить.

§ 21. Следует конкретизировать, что нужно понимать под аппаратурой. Кроме того, требование данного параграфа следует распространить и на линии напряжением свыше 110 *кв* и одновременно оговорить, что на линии, имеющие резерв, это требование может не распространяться.

§ 22. Следовало бы оговорить, что на линиях 110—220 *кв*, связывающих основные станции системы, сооружение ответвлений не допускается.

§ 23. Данный параграф следует дополнить следующим абзацем: «при этом указанная линия должна быть оборудована устройством для пофазного АПВ».

4. Выбор сечений и материала проводов воздушных линий. Прежде всего следует отметить, что ряд преимуществ, создаваемых подземной канализацией электрической энергии, и наблюдаемое развитие кабельных сетей (в частности, сетей 35 и 110 *кв*) обязывает дать рекомендации по области применения такого рода сетей, а не ограничиться только указаниями по выбору сечений и материалов проводов воздушных линий. Должны быть даны также рекомендации по основным принципам проектирования кабельных сетей. Также не лишне отметить, что в заголовке данной главы указывается о выборе материала проводов воздушных линий, в тексте же главы эти указания отсутствуют. Этот пробел, несомненно, следует восполнить.

§ 24. Экономическая плотность тока будет зависеть от того, увеличивается ли из-за принятия экономической плотности тока только сечение проводов линии или же необходимо будет соорудить дополнительные линии. Ввиду указанного после табл. 1 следует добавить: «В случаях, когда применение указанных плотностей тока связано с увеличением числа линий сверх минимально необходимого по условиям резервирования, следует исходить из того, что увеличение числа линий становится целесообразным при значениях плотности тока, превышающих указанные в таблице. В этих случаях сочетание числа линий с сечениями проводов должно обосновываться технико-экономическими соображениями.

В дополнительном параграфе должны быть добавлены указания по экономически целесообразным плотностям тока для кабелей с примечанием, что увеличение числа кабелей в кабельной линии становится целесообразным лишь при значениях плотностей тока, превышающих экономические плотности тока, рекомендованные МЭС (1,25 — 1,8 *а/мм*²). В этом случае число и сечение кабелей определяются технико-экономическими расчетами. Также следует рекомендовать в многокабельных линиях не применять кабели с сечением жил ниже 95—120 *мм*².

26. Указание единой расчетной температуры окружающего воздуха в 25° С вряд ли целесообразно для всего Союза. Правильнее указать, что только при отсутствии данных многолетнего наблюдения в качестве расчетной температуры для данного района допускается принимать температуру 25° С. Следует также указать, что понимается под расчетной температурой окружающего воздуха.

Табл. 2 из рассматриваемого раздела Правил следует исключить — ее следует поместить в специальном разделе Правил, в котором должны быть даны допускаемые нагрузки также на кабели, изолированные провода и шины.

5. Регулирование и уровни напряжений и частоты в электрических системах. В заголовке данной главы упомянута частота, в тексте же главы никаких указаний о частоте не приводится. Между тем полезно было бы дать указания о применении автоматической разгрузки по частоте со ссылкой на допустимые отклонения частоты.

§ 29—34. Работа с отключенным устройством для регулирования напряжения является сама по себе аварийным режимом, вследствие чего сочетание ее с аварийными режимами системы является неудачным. По смыслу, очевидно, имеются в виду те случаи, когда устройства для регулирования напряжения не установлены. Это и следовало бы указать в рассматриваемой главе.

Предлагается формулировку § 29—34, с учетом отмеченных выше замечаний по § 9, изменить следующим образом:

§ 29 «Вопросы регулирования напряжения и покрытия реактивных нагрузок электрических систем должны рассматриваться взаимосвязно.

Регулирование напряжения на шинах 6—10 *кв* станций и подстанций осуществляется, исходя из принципа поддержания требуемого уровня напряжения у электроприемников.

Регулирование напряжения в основных сетях высокого напряжения системы осуществляется, исходя из принципа получения минимума потерь в сетях (за счет рационального распределения реактивной мощности между отдельными электростанциями и компенсирующими устройствами).

§ 30. На шинах 3—10 *кв* районных подстанций и электростанций в нормальных режимах должны обеспечиваться напряжения в пределах +5% в максимум и 0% в минимум нагрузки от величины номинального напряжения распределительной сети. При нарушении нормальной работы электрической системы напряжение на шинах 3—10 *кв* районных подстанций и электростанций в максимум нагрузки не должно быть ниже номинального напряжения распределительной сети.

Для обеспечения указанных отклонений напряжения, как правило, должны устанавливаться на подстанциях трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой в пределах ±(7,5 12,5)%.

§ 31. В тех случаях, когда подстанция не может быть обеспечена устройством для регулирования напряжения, используются возможности системного регулирования, при этом на шинах 3—10 *кв* допускаются следующие отклонения от номинального напряжения распределительной сети:

а) в нормальных режимах при максимуме нагрузки не ниже +2,5% и при минимуме — не выше +7,5%;

б) при плановых ремонтах оборудования в максимум нагрузки не ниже ±0,0%;

в) в аварийных режимах при максимуме нагрузки не ниже — 2,5%.

§ 32. В системных высоковольтных сетях уровень напряжения в основных узлах потребления, при нормальном режиме и распределении реактивной мощности соответственно принципу минимума потерь, не должен быть ниже величин 35—110—220 *кв*.

Если уровень напряжения получается значительно более низкий, то должна быть осуществлена установка регулировочных трансформаторов, обеспечивающая независимое регулирование напряжения в отдельных частях системы.

Для регулирования распределения активной и реактивной мощностей в замкнутых контурах 110—220 *кв* рекомендуется применять трансформаторы с продольно-поперечным регулированием.

§ 33. При сезонных изменениях режимов работы системы и на период плановых ремонтов основного оборудования регулирование напряжения может осуществляться путем перестановки ответвлений на трансформаторах.

В заключение отметим, что рассматриваемый раздел Правил желательно пополнить общими положениями об

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

установке электроизмерительных приборов и счетчиков, в том числе счетчиков потерь.

* * *

Все замечания по разделу «Электроснабжение промышленных предприятий», приведенные в отзывах, показывают, что рассматриваемый раздел Правил может быть принят в качестве основы, но в то же самое время требует ряда уточнений и дополнений.

Область применения. Прежде всего следует отметить, что между отдельными разделами Правил нет единообразия в редакции и расположении материала, так, например, в разделе Правил «Указания по проектированию электрических систем» определения и область применения объединены в общую главу, в рассматриваемом же разделе Правил они разбиты по отдельным главам. Это же замечание относится и к наименованию упомянутых Правил в одном случае «Указания по проектированию...», в другом случае просто «Электроснабжение...».

§ 1. Ограничение данного раздела Правил предприятиями с установленной мощностью электроприемников выше 1 000 *квт* является необоснованным, так как все указания этого раздела в равной мере могут быть отнесены и к предприятиям с установленной мощностью менее 1 000 *квт*. Правильнее будет ограничить область применения данного раздела Правил предприятиями, получающими электроэнергию от собственных электрических станций, от сетей районных энергетических управлений или коммунальных электрических станций при напряжении выше 1 000 *в*.

Определения. § 2. Линии не следовало бы называть источниками питания промышленных предприятий. Источниками питания могут быть электростанции и подстанции (районные, коммунальные или собственные).

§ 3. Две секции сборных шин одной и той же электростанции или подстанции, даже при одновременном соблюдении указанных в данном параграфе двух условий, для нагрузок первой категории не могут рассматриваться как независимые источники питания. В ряде случаев под независимыми следует понимать источники территориально разобщенные.

Приведенные в данной главе определения, безусловно, следует уточнить и дополнить определениями для линий; магистральных, кольцевых, тупиковых и др., а также подстанций: распределительных, трансформаторных, преобразовательных и т. п.

Классификация нагрузок промышленных предприятий. § 4. Классификация нагрузок приведена в разделе Правил «Указания по проектированию электрических систем» при этом несколько в отличной и в то же самое время весьма сходной редакции. Классификацию нагрузок, поскольку она повторяется в нескольких разделах Правил, следовало бы вынести в общий раздел, в Правилах же, относящихся к промышленным предприятиям, если и нужно сохранить рассматриваемую главу, то ее следует расширить и конкретизировать.

В пункте «в» указывается, что к третьей категории нагрузок относятся нагрузки «вспомогательных цехов и механизмов». Это определение в части вспомогательных механизмов неудовлетворительно, так как вспомогательные механизмы, в частности в прокатных цехах, часто отнюдь не являются малоответственными.

Требования к надежности электроснабжения. Эту главу следовало бы объединить в общую главу с предыдущей и при этом привести к единообразию по содержанию и редакции с § 18 «Указаний по проектированию электрических систем».

§ 6 лучше было бы сформулировать следующим образом: «Питание нагрузок первой категории должно быть осуществлено таким образом, чтобы при авариях питание этих нагрузок сохранялось либо могло быть восстановлено в течение промежутка времени меньше того, который может повлечь за собой последствия, указанные в § 4 п. «а» настоящих Правил».

§ 7. Степени обеспеченности питания нагрузок второй категории следовало бы определять по технико-экономическим соображениям, а не по «местным условиям», что неопределенно.

В § 5—9 ничего не говорится о питании нагрузок третьей категории, для которых следовало бы широко рекомендовать применение катучего или складского резерва.

Выбор схемы электроснабжения и напряжения. § 10. Рекомендация об устройстве глубоких вводов должна быть распространена и для линий 154 *кв*. Вместо разукрупнения подстанций лучше сказать «применение подстанций малой мощности».

Внедрение напряжения 35 *кв* должно быть представлено в более широком виде; применение этого напряжения нельзя ограничить только мощными электроприемниками, особенно в том случае, когда для остальных электроприемников введение напряжения 35 *кв* не дает каких-либо выгод.

§ 11. Представляется излишним указание о том, что технико-экономические показатели должны включать стоимость электроснабжения в целом (капитальные затраты, потери), а также надежность электроснабжения.

Последнее является естественным содержанием технико-экономических показателей.

После слов: «напряжение приемников электроэнергии» (проще сказать «напряжение электроприемников») следует добавить «и сетей».

§ 12. Необходимо добавить: «Допускается применение других напряжений и систем, если их целесообразность будет подтверждена технико-экономическими расчетами».

Токи короткого замыкания и выбор аппаратов. § 14. Этот параграф противоречит указаниям § 2 раздела Правил «Распределительные устройства напряжением до 1 000 *в*», в котором говорится о проверке по токам короткого замыкания также проводов, шин, аппаратов и приборов в установках до 1 000 *в*.

Колебания напряжения. Необходимо отметить, что следует отличать колебания напряжения от отклонений напряжения от номинального напряжения распределительных сетей. Под колебанием напряжения следует понимать кратковременные изменения напряжения, вызываемые пусковыми токами, резкими изменениями нагрузки, переходными процессами и т. п., под отклонениями же напряжения — достаточно длительное изменение напряжения, обусловливаемое теми или иными режимами работы электрической системы и достаточно плавными изменениями электрических нагрузок. С этой точки зрения название главы неудачно, его следует изменить на «Регулирование и уровни напряжения» (как озаглавлена соответствующая глава в «Указаниях по проектированию электрических систем»).

§ 15. В соответствии с вышеизложенным в последнем предложении данного параграфа вместо «Уровни и колебания...» следует написать «Уровни и отклонения напряжений...».

§ 16. Пункт «б» данного параграфа следует сформулировать так: «б) снижения напряжения у наиболее удаленного светильника при нормальных режимах, как правило, не должны превышать 2,5% от номинального напряжения ламп; допускается более высокое снижение этого напряжения (до 4%) при условии соблюдения при сниженном напряжении нормированной освещенности».

Кроме того, следует добавить:

«в) снижение напряжения у наиболее удаленных электроприемников при аварийных режимах не должно превышать 10% от номинального как для электродвигателей, так и для ламп».

Релейная защита, учет энергии и измерения. § 18. Пункт «б» следует дополнить указанием о желательности учета расхода реактивной энергии по цехам.

§ 19. Для пояснения, что понимается под сетями высокого напряжения с малыми токами замыкания на землю, следовало бы дать ссылку на § 16 раздела Правил «Заземления в электрических установках напряжением выше 1 000 *в*».

В конце параграфа вместо слова «фидеров» лучше написать «линий».

Связь и диспетчеризация. Данную главу следует исключить и вопросам связи и диспетчеризации посвятить специальный раздел Правил с учетом того что эти вопросы имеют еще большее значение для электрических систем, в «указаниях по проектированию» которых подобная глава отсутствует. Кстати неясно, что подразумевается под понятием «крупных систем», «сложных систем». Кроме того, недостаточно обосновано требование о необходимости телефонной связи для всех подстанций.

Компенсация реактивной мощности. § 21. Следует исключить регламентацию величины коэффициента мощности значением не ниже 0,85.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

§ 22. В этот параграф следует внести рекомендацию о преимущественной установке статических конденсаторов в потребительских сетях.

Выбор сечения проводов воздушных линий. Эту главу следует дополнить выбором сечений кабельных линий с соответствующей ссылкой на главу 4 раздела Правил «Указания по проектированию электрических систем», по которой даны указания о необходимых дополнениях. С учетом этих дополнений необходимость в последнем абзаце этого параграфа отпадает. К тому же этот абзац изложен неудовлетворительно: какое имеет значение длина линии при установлении экономической плотности тока? Что такое значительная нагрузка?

В заключение следует указать, что рассматриваемый раздел Правил желательно дополнить основными положениями по выбору трансформаторов, по схемам коммутации подстанций и сетей, а также основными положениями по установке измерительных приборов.

Инж. Д. Б. МОДНРУС

Председатель секции электропечных установок

Раздел «*Электропечные установки*» как по объему, так и по содержанию является схематичным, не отражающим всего многообразия современного промышленного применения электротермии; отсутствуют четкие и конкретные рекомендации, учитывающие специфические условия и особенности схем и аппаратуры этих установок.

Промышленное применение электронагрева является относительно новой областью промышленной электротехники, обладающей рядом специфических особенностей, не нашедших до сего времени отражения в ранее выпускающихся изданиях Правил устройства электротехнических установок. Так, например, потребность канализации токов весьма большой силы (измеряемых десятками тысяч ампер) или высокой частоты и связанная с этим необходимость максимального снижения вредного влияния реактивности шинопровода вынуждает применять расстояния между шинами разных полярностей на много меньшие, чем это оговорено в соответствующих разделах Правил. В такой же мере стремление максимального сокращения протяженности резонансных контуров высокочастотных установок приводит к необходимости установки конденсаторных батарей вблизи от приемников энергии непосредственно в производственных цехах. Применение для промышленных целей новой области высокочастотной электротермии повлекло за собой разработку специальной аппаратуры. Широко применяется водяное охлаждение различных высоковольтных аппаратов, применяются изоляционные материалы с особыми свойствами, не применяемые в обычных высоковольтных установках, и т. д

Естественно, что выпуск нового издания Правил устройства электротехнических установок должен был бы ликвидировать все вышеуказанные недостатки старых изданий, тем более, что в новом издании область промышленной электротермии выделена в специальный раздел, названный «Электропечные установки».

Рассматриваемый раздел Правил практически не изменил существующего ранее положения. Более того, § 1 раздела, устанавливающий, что «Электропечные установки» помимо настоящих правил должны отвечать требованиям общих правил устройства электротехнических установок сильного тока в той мере, в какой они не изменены настоящими правилами, распространяет на электротермические установки ряд положений прочих разделов Правил, применение которых к этим установкам в ряде случаев недопустимо, поскольку никаких оговорок об этом в тексте рассматриваемого раздела Правил нет. Это относится, например, к § 74 раздела «Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1 000 *в*»; § 17 раздела «Распределительные устройства напряжением до 1 000 *в*», регламентирующим минимальные расстояния между шинами разной полярности; к ряду параграфов раздела «Статические конденсаторы» и т. д.

В области высокочастотных установок, получивших за последние годы широкое применение в промышленности, рассматриваемый раздел Правил ограничивается утверждением нескольких общих положений, сформулированных в шести параграфах, и не содержит, по существу, ни одного параграфа, который бы включал определенные конкретные рекомендации по устройству этих установок. Эта глава рассматриваемого раздела Правил отнесена как к установкам с машинными, так и к установкам с ламповыми генераторами, в то время как указанные типы установок коренным образом отличны друг от друга по принципу выполнения, электрической схеме и применяемой аппаратуре и рассматриваться совместно принципиально не могут. Не оговорены также некоторые особенности заземления высокочастотных установок, ничего не сказано о требованиях защиты установок с ламповыми генераторами от излучения радиопомех и т. д.

Кроме вышеуказанного общего недостатка рассматриваемого раздела Правил, последний содержит ряд, по существу, ошибочных или недостаточно четко сформулированных параграфов.

«§ 6. Все металлические части электропечных установок для защиты от коррозии и уменьшения тепловых потерь должны быть окрашены алюминиевой краской». Алюминиевой краской следует рекомендовать окраску только поверхности электропечей сопротивления и дуговых для снижения тепловых потерь с их поверхности; окрашивать же алюминиевой краской «все металлические части электропечных установок», к которым должны быть отнесены также каркасы щитов управления, каркасы индукционных печей, кожухи высокочастотных ламповых установок и даже медные или алюминиевые ошиновки, не только не рекомендуется, но даже нежелательно, так как эти «металлические части» должны окрашиваться краской, способствующей максимальной теплоотдаче с их поверхности.

«§ 8. Электромашинные залы высокочастотных установок индукционного и диэлектрического нагрева должны быть выполнены и т. д.».

Известно, что установки диэлектрического нагрева работают при частотах, измеряемых миллионами герц (практически применяемый нижний предел частоты для этих установок составляет 0,5 *мггц*) и поэтому никаких электромашинных зал для этого типа установок не требуется.

§ 10. Заземление электропечных установок должно выполняться в соответствии с разделом Правил устройства «Заземление электрических установок до и выше 1 000 *в*». Утверждение недостаточно правильное, так как указанный раздел Правил не учитывает ряда особенностей заземления высокочастотных установок, как, например, влияние поверхностного эффекта в заземляющих проводах, наличие весьма больших емкостей одного или обоих полюсов высокочастотной цепи относительно земли, наличие, как правило, глухого заземления одного полюса высокочастотной цепи и т. д.

«§ 20. Каждая электропечь должна снабжаться измерительными приборами для учета мощности и потребления энергии». Формулировка ошибочна; вероятно, имеются в виду приборы для измерения мощности и учета электроэнергии.

«§ 25. Выбор шин, проводов и кабелей высокой частоты следует производить с учетом увеличения активного сопротивления вследствие поверхностного эффекта». Указание — принципиально ошибочное, так как влияние поверхностного эффекта зависит не только от частоты тока, а также и от сечения провода (т. е. косвенно и от тока). Коэффициент увеличения активного сопротивления для проводника из определенного данного материала пропорционален величине $\sqrt{f} \cdot S$, где f — частота тока, а S — поперечное сечение проводника. Таким образом, влияние поверхностного эффекта в тяжелых ошиновках нормальной частоты 50 *гц* (для токов, измеряемых тысячами ампер) может сказаться значительно больше, чем его влияние в высокочастотных проводах, рассчитанных на доли ампера, даже при частотах, измеряемых миллионами герц. Следовательно, учитывать влияние поверхностного эффекта для всех случаев проводок высокой частоты (как рекомендует данный параграф) неправильно, тогда как учитывать влияние этого эффекта для определенных случаев тяжелых ошиновок нормальной частоты необходимо. Параграф должен содержать конкретные указания, при каких значениях $\sqrt{f} \cdot S$ должно учитываться влияние поверхностного эффекта.

§ 27. «Применение кабелей со стальной броней и прокладка проводов в стальных трубах для цепей высокой ча-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

стоты не допускается». Практика показала, что для определенного диапазона частот (до 8 *кгц*) такая прокладка допустима при условии, что внутри трубы или в кабеле со стальной броней заключены провода или жилы, несущие токи прямого и обратного направлений. Кроме перечисленных примеров, рассматриваемый раздел Правил содержит еще ряд более мелких неточностей и погрешностей.

На основании изложенного следует рекомендовать настоящий раздел Правил переработать на базе следующих основных положений:

Общее наименование раздела должно быть изменено и раздел следует наименовать «Промышленные электротермические установки», как более отвечающее существу охватываемых разделом вопросов. Содержание раздела должно быть разбито на следующие подразделы:

I. Определения и область применения.

II. Установки дуговых и руднотермических электропечей.

III. Высокочастотные электротермические установки с машинными генераторами.

IV. Высокочастотные электротермические установки с ламповыми генераторами.

V. Установки электропечей сопротивления.

VI. Проводки и ошиновки электротермических установок.

Подраздел «Установки дуговых и руднотермических электропечей» должен включать самостоятельную главу, посвященную подстанциям дуговых и руднотермических электропечей. Эта глава должна не только фиксировать допустимые для этих подстанций отклонения от раздела Правил — «Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1 000 *в*», как это имеет место в рассматриваемом разделе, но и устанавливать определенные рекомендации по устройству этих подстанций (расположение аппаратуры, расстояния и пр.), особенно при их однокамерном выполнении.

Подраздел «Высокочастотные электротермические установки с машинными генераторами» должен быть построен со ссылкой на значительную часть параграфов разделов Правил «Электромашинные залы» и «Статические конденсаторы». Кроме того, должны быть специально оговорены допустимые отклонения от указанных разделов, учитывающие особенности высокочастотных установок и конструктивные особенности высокочастотной аппаратуры.

Подраздел «Высокочастотные электротермические установки с ламповыми генераторами» должен быть построен на базе того, что данные установки могут быть с большой степенью точности приравнены к комплектным распределительным устройствам (КРУ) и комплектным трансформаторным подстанциям (КТП) и, следовательно, для этого подраздела может быть в значительной степени использована соответствующая глава раздела Правил «Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1 000 *в*». В этом же подразделе должны быть оговорены все особенности высокочастотных ламповых установок и предъявляемые к ним специальные требования. В частности, должны быть даны конкретные указания по устройству защиты от излучения радиопомех и от проникновения их в электросеть по питающим установку проводам.

В подразделе «Проводки и ошиновки электротермических установок» должны быть четко установлены границы, до которых распространяются соответствующие специальные разделы Правил для различных типов и случаев устройства электротермических установок.

Должны быть конкретные рекомендации по конструктивному выполнению высокочастотных и сильноточных проводок и ошиновок. Должны быть приведены таблицы допустимых нагрузок на кабели, провода и шины для высоких частот или для тяжелых сильноточных ошиновок. В случае затруднения привести такие таблицы должны быть приведены конкретные рекомендации по методу расчета вышеуказанных проводок и ошиновок и указаны признаки, определяющие необходимость производства этих расчетов для разных типов ошиновок и проводок.

В соответствующих подразделах должны найти отражение вопросы, связанные с заземлением и со строительной частью, являющиеся отличными по сравнению с оговоренными в соответствующих разделах Правил.

Инж. Г. М. КНОРРИНГ

Председатель секции осветительных установок

Оставляя в стороне мелкие поправки редакционного характера, можно признать, что более или менее серьезные возражения вызывают лишь немногие параграфы раздела «Осветительные установки» и что в целом раздел может быть принят в качестве основы для составления окончательной редакции, но предварительно остановимся на двух вопросах общего характера.

1. Некоторыми организациями, в основном Ленэнерго, высказан ряд пожеланий о доработке раздела в направлении дальнейшей конкретизации требований. Хотя конкретность требований следует считать обязательной при изложении нормативных материалов, необходимо предостеречь от превращения Правил в детально разработанные технические условия. Правила создаются на достаточно длительный период времени и во все время их действия они не должны являться тормозом на пути технического прогресса.

2. Специфичной особенностью раздела «Осветительные установки» является наличие второго, параллельного документа, посвященного нормированию промышленного освещения — ГОСТ 3825-47. В этом ГОСТ рассматриваются в основном вопросы нормирования освещенности и качественные требования к освещению, но затрагиваются также и вопросы, общие с Правилами: область применения аварийного освещения, постоянство напряжения в сети и т. д. Очевидно, что нет смысла повторять одни и те же требования в двух документах, примерно равноправных по значению. Это может оказаться и просто вредным. Следует считать, что такой ГОСТ вообще не нужен; более того можно высказать пожелание, чтобы и вопросы нормирования освещенности были включены в Правила. Тогда последние станут единым документом, всесторонне охватывающим вопрос; в этом случае полностью отпадет надобность в особом ГОСТ.

Перейдем к рассмотрению спорных параграфов раздела.

1. Как в Правилах, так и в ГОСТ 3825-47 два вида освещения, рассматривавшиеся ранее раздельно и известные под наименованиями «освещение безопасности» и «аварийное освещение» объединены в один вид и названы аварийным освещением.

Приняв объединенный термин, мы сразу же встречаемся с необходимостью, говоря об аварийном освещении, пояснять, какое аварийное освещение имеется в виду: для продолжения работы или для эвакуации персонала. Таким образом, по существу, сохраняются два отдельных понятия, только выражаемые большим количеством слов, чем прежде. При этих условиях следует считать целесообразным возврат к прежним терминам, т. е. к «аварийному освещению» и «освещению безопасности».

2. Существенные возражения вызывает § 11 Раздела, который требует, чтобы в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, при высоте установки светильников над полом менее 2,5 *м*, либо применялись светильники специальной конструкции, исключающей возможность доступа к лампам без специальных приспособлений, либо питание производилось при напряжении не свыше 35 *в*.

Соблюдение этих требований представляется в ряде случаев весьма затруднительным. Действительно, подавляющее большинство производственных помещений, имея по крайней мере один признак повышенной опасности (проводящие полы, загроможденность металлическим оборудованием), относятся к категории помещений «с повышенной опасностью». Необходимость подвеса светильников на высоте менее 2,5 *м* возникает не только в низких помещениях, тоннелях и т. п., но и в цехах нормальной высоты, при устройстве локализованного освещения. В большинстве помещений электрических подстанций светильники также подвешиваются на высоте менее 2,5 *м*. Применение во всех подобных случаях светильников специальной конструкции, предусмотренной § 11, не только существенно удорожает установку, но и ведет к большому увеличению расхода энергии, так как вынуждает отказываться от рациональных типов светильников. Что касается напряжения 36 *в*, то, не говоря уже об утяжелении сети, наличие для этого напряжения ламп мощностью только до 50 *вт* делает крайне затруднительным создание высоких освещенностей, в ряде случаев необходимых для рабочих мест.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Наконец, на высоте менее 2,5 *м* сплошь и рядом приходится подвешивать светильники с люминесцентными лампами, вообще не изготовляемыми на напряжение менее 127 *в*. Таковы соображения о возможности соблюдений требования § 11. Представляется желательным смягчение требований этого параграфа. Можно предложить, чтобы для светильников, подвешенных на высоте менее 1,8—2 *м*, напряжение выбиралось как для светильников местного освещения и чтобы требования § 11 были сохранены, как максимум для помещений сырых, особо сырых, жарких и с едкими парами или газами.

3. Представляет принципиальный интерес замечание Ленэнерго по § 15, устанавливающему минимальный уровень напряжения в сети. Суть замечания сводится к тому, что, поскольку нам неизвестен фактический режим работы ни сети высшего напряжения, ни трансформаторов, нормирование уровня напряжения не соответствует реальным условиям и следует заменить его нормированием потери напряжения в осветительных сетях.

С соображениями Ленэнерго, как будто, нельзя не согласиться. Действительно, для того, чтобы перейти от заданного уровня напряжения к расчетной потере напряжения в сети, приходится делать целый ряд допущений в отношении коэффициента загрузки трансформаторов, коэффициента мощности и уровня напряжения на стороне высшего напряжения. Установление определенного значения расчетной потери напряжения представляется для проектной практики весьма заманчивым. Тем не менее Секция считает, что становиться на путь подобного упрощенчества недопустимо. Мы не знаем, конечно, фактического уровня напряжения на выводах низшего напряжения трансформаторов. Однако мы знаем, что при прочих равных условиях этот уровень определенным образом зависит от мощности трансформатора и что при чисто осветительной нагрузке потеря напряжения в самом трансформаторе на 2—2,5% меньше, чем при смешанной нагрузке. Отказаться от учета этих обстоятельств — значило бы поставить различные осветительные установки в несопоставимые условия и потерять один из важнейших критериев для технико-экономических сопоставлений различных схем питания.

Представляется возможным учесть пожелания Ленэнерго лишь частично, а именно конкретизировать те расчетные условия, которые должны приниматься для перехода от нормированного уровня напряжения к величине расчетной потери напряжения, по крайней мере, в обычных условиях. Это принесло бы определенную пользу с точки зрения внесения ясности и единообразия в вопрос выбора величин потери напряжения.

4. Наиболее серьезной переработки требует § 17, рассматривающий выбор исполнения светильников в зависимости от условий среды. Некоторые организации высказали пожелания о конкретизации требования § 17. Подобные пожелания понятны и естественны, но, как указано выше, именно здесь необходимо соблюдение особой осторожности. По существу, нам необходимо, чтобы исполнение светильника обеспечивало его безопасность, надежность, а по возможности также и долговечность при данных конкретных условиях среды, способы же, которыми эти цели могут быть достигнуты, весьма разнообразны, подвержены изменениям с течением времени и, по существу, могут быть названы только в качестве примера.

Оставляя в стороне вопросы выбора светильников для пожаро- и взрывоопасных помещений (в общем достаточно удовлетворительно рассмотренные в соответствующих разделах Правил), остановимся на выборе светильников для помещений с повышенным содержанием в атмосфере влаги или пыли. Надо прежде всего сказать, что сама классификация светильников по исполнению, принятая в Правилах, представляется малоудачной и не дает четкого представления о приспособленности того или иного исполнения к определенным условиям среды. Действительно, с точки зрения применимости светильников разница между «открытым» и «закрытым неуплотненным» исполнением почти неощутима. Далее, Правила определяют «закрытое уплотненное» исполнение, как такое, при котором обмен воздуха между полостью светильника и окружающим пространством ограничен уплотняющими прокладками или резьбовым соединением. В какой степени подобные светильники защищены, например, от проникновения пыли, остается совершенно неясным. Наконец, в «герметических» светильниках обмен воздуха предполагается вообще исключенным. Область применения светильников, в которых соблюдается это условие, практически неограничена. Однако в реальных условиях «герметическим» признается только такой светильник, герметичность которого в каждый момент автоматически контролируется, например, с помощью пневматического устройства. Таким образом, классификация светильников по исполнению должна быть уточнена.

По существу § 17 надо сказать, что надежность и безопасность светильников, устанавливаемых в помещениях особо сырых, а также с едкими парами, может быть обеспечена различными путями. Правила требуют в этом случае герметичности светильника и антикоррозийных покрытий частей, доступных воздействиям среды. Это весьма устаревшая точка зрения, которая отсутствовала в первоначальных редакциях раздела и получила отражение только при окончательном его редактировании. Проектная и эксплоатационная практика давно уже нашла иной путь решения задачи: корпус светильника и патрона образуют единое целое и изготовляются из изолирующих влагоупорных материалов (фарфор, пластмасса). Ввод проводов осуществляется раздельно, так что они не соприкасаются друг с другом или с какими-либо металлическими частями до места присоединения к контактным винтам. Металлические отражатели, в случае необходимости применения таковых, укрепляются к изолирующему корпусу светильника.

Сопоставляя подобные конструкции с герметическими светильниками, можно убедиться, что последние значительно дороже и значительно сложнее в эксплоатации. Герметичность светильников, не имеющих добавочных устройств для ее контроля, сплошь и рядом нарушается, не говоря уже о том, что довольно часто в эксплоатации приходится встречать «герметические» светильники со снятыми защитными стеклами.

Несколько менее строго подходят Правила к светильникам для сырых помещений и наружных установок, но и здесь явное предпочтение отдается светильникам в закрытом исполнении, с отводом конденсационной влаги. Едва ли можно признать обоснованным требование снабжать светильник замкнутым стеклом, в сочетании с требованием иметь в этом стекле отверстие.

Из изложенного ясно, в каком направлении Секция рекомендует пересмотреть § 17: следует обратить основное внимание на цель, которой должна удовлетворять конструкция светильников в этом или ином случае, и указаны, в виде примера, способы, которыми эта цель может быть достигнута.

5. Правила (§ 32) требуют, чтобы у трансформаторов, питающих светильники на напряжение 36 *в* и ниже, либо один из выводов вторичной обмотки, либо ее нейтраль были заземлены. Возражая против этого требования, Ленэнерго указывает, что оно ухудшает, а не улучшает условия безопасности. По мнению Ленэнерго, вероятность пробоя между обмотками трансформатора 12—36 *в* ничтожно мала, введение же в сеть местного освещения потенциала общего нулевого или заземляющего провода может служить существенным источником опасности. Надо отметить, что принятие предложения Ленэнерго связано с отказом от использования в качестве одного из проводов сети 12—36 *в* газовых труб и металлоконструкций здания, т. е. ведет к удорожанию установки. Секция не располагает достаточными эксплоатационными данными по этому вопросу и надеется получить по нему мнение работников заводских энергобюро.

6. В правилах не нашел отражения вопрос о защите сетей наружного освещения. В течение ряда лет широкое распространение для этой цели имели индивидуальные предохранители (грибообразного типа), однако в последнее время Инспекция МЭО вынесла решение об отказе от этих предохранителей. Секция не считает такой отказ целесообразным. Сети наружного освещения часто бывают весьма протяженными и разветвленными, и наличие индивидуальных предохранителей оказывается весьма полезным с точки зрения локализации и обнаружения аварий. Отмечены случаи длительного отключения наружного освещения предприятий из-за поисков арматуры, в которой произошло замыкание. Представляется желательным восстановить в Правилах требование об установке у светильников наружного освещения индивидуальных предохранителей.

Мы рассмотрели только основные замечания, внесенные по разделу «Осветительные установки». Само собой

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

разумеется, что помимо них имеется довольно большое число менее существенных замечаний, многие из которых рекомендуется учесть при составлении последующей редакции раздела.

Инж. М. М. ЗАРХИН

Председатель секции кабельных линий

В отношении общего содержания раздела *«Кабельные линии напряжением 35 кв и ниже»* следует считать желательным дополнить его следующими главами:

1. Область применения кабельных линий.
2. Область применения, способы и нормы использования оболочек кабелей в качестве нулевого провода.
3. Организационные мероприятия по прокладке кабелей, выбор трассы, исследование и требования к грунту и т. д.
4. Прокладка кабелей в подвалах.

Поскольку наиболее распространенным видом прокладки кабелей является прокладка их под землей, целесообразно главы 2 и 3 поменять местами.

Существующие главы полагаем целесообразным дополнить: 1) главу I — указанием о запрещении выполнения одной кабельной линии из разнородных по материалу кабелей; 2) главу 3 — рекомендацией расстояний между кабелями и шоссейными дорогами при параллельном следовании, а также конкретными указаниями об условиях прокладки кабелей в зонах с блуждающими токами (без ссылок на другие разделы Правил); 3) главу 4 — указанием о снятии с кабелей, проложенных в тоннелях, каналах и подвалах внешних защитных покровов из горючих волокнистых веществ и защиты его металлических оболочек от коррозии.

По отдельным параграфам желательно внести следующие дополнения и редакционные изменения: объединить § 7 с § 3; добавить в § 14 слова «Соединение и оконцевание жил»; § 24 желательно дополнить указаниями о том, как осуществлять прокладку кабелей в почвах, упомянутых в этом параграфе; в § 25 добавить слова «и соединительные муфты подводного типа»; также осветить в этом параграфе вопрос о возможности прокладки кабелей в болотистом грунте.

В § 34—38 необходимо ввести указания о пересечениях кабелей с газопроводами. В § 34 следует допустить превышение температуры с 5° С до 10° С. В § 35 в конце первого абзаца величину размера в 1 *м* уменьшить до 0,5 *м*; добавить также, что трубы могут быть из огнестойкого или полуогнестойкого материала, при этом трубы и плиты должны обладать достаточной механической прочностью.

§ 37 в абзац о пересечении с электрическими железными дорогами после слов: «При «пересечении» добавить «и при сближении», указав предельное для сближения расстояние. Ссылку на правила заменить конкретными указаниями по защите от коррозии.

В § 53 следует внести указание о возможности в некоторых случаях (короткие участки, ответвления в цеха и т. п.) применить нормальные кабели, при условии снятия с них внешних защитных покровов из волокнистых веществ.

В § 62 в последнем абзаце после слов «где русло» добавить «и берега». § 63 дополнить указаниями о том, что в случае применения соединительных муфт последние должны быть специальной конструкции, предусматривающей их защиту от разрывов и от сплющиваний. В § 65 в последнем абзаце вместо слова «кабели» написать «защитные металлические оболочки кабелей». § 66 дополнить указанием о том, что прокладка кабелей по деревянным мостам должна осуществляться в огнестойких или полуогнестойких трубах. В конце § 68 добавить, что кабели должны иметь слабину.

Доктор техн. наук, проф. А. А. ГЛАЗУНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

По разделам *«Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 000 в»* и *«Воздушные линии электропередачи напряжением до 1 000 в»* Министерством электростанций СССР были получены замечания более чем от 30 организаций. Обращает внимание отсутствие замечаний от наших крупнейших эксплоатирующих организаций: Мосэнерго, Ленэнерго, Уралэнерго и др., которые, имея громадный опыт эксплоатации, могли бы внести существенные поправки в Правила устройства воздушных линий или дать авторитетное одобрение разработанным Правилам устройства. Получены замечания только от отдельных звеньев этих энергообъединений.

В этом обзоре приводятся наиболее существенные замечания, требующие обсуждения при окончательном составлении Правил устройства. В обзоре автор высказал свои соображения, связанные с рассматриваемыми замечаниями.

Энергосбыт Калининэнерго считает необходимым согласование Правил с Главным управлением шоссейных дорог МВД СССР и Министерством речного флота СССР. Отсутствие согласования с этими организациями бесспорно в ряде случаев затруднит проектирование и строительство воздушных линий.

Работники Центроэлектромонтажа МСПТИ М. М. Зеленецкий и К. Ф. Красовский вносят предложение о расширении Правил введением в них Правил устройства для временных линий, сооружаемых на торфолесозаготовках, строительных площадках и т. п., считая, что для них могут быть приняты менее жесткие Правила. С этим предложением согласиться нельзя. Приняв это предложение, нужно будет включить также правила для контактной сети электрифицированных железных дорог, линий, подвешиваемых на опорах контактной сети и других специальных случаев. Правила получатся громоздкими, неудобными для пользования. Целесообразнее иметь отдельные специализированные Правила устройства воздушных линий, согласованные с общими Правилами МЭС.

Энергосбыт Молотовэнерго настаивает на уточнении определений категорий потребителей, указывая, что такие формулировки, как «брак продукции», «порча оборудования», «длительная остановка» и т. п., не содержащие никаких количественных границ, дают возможность из-за этой неопределенности многие производства относить, по своему желанию, к любой категории. Например, любая сушильная печь, любой механический цех с обработкой металла на больших скоростях резания могут быть, при принятых в Правилах формулировках, отнесены к потребителям категории 1. Указывается на желательность переноса определения категорий потребителей в общий раздел Правил, не повторяя их в ряде разделов. Представляется, что пожелание энергосбыта Молотовэнерго практически невыполнимо. Дать указания, по которым потребитель может быть точно отнесен к той или иной категории, нельзя. Характер потребителей, условия их работы и электроснабжения, стоимость продукции, выпускаемой ими, и т. п., чрезвычайно различны и нормирование их с точки зрения схем электроснабжения вряд ли возможно или будет столь громоздким, что не даст инженерных решений. Вопрос об отнесении потребителя к той или иной категории должен решаться в каждом отдельном случае на основе общеинженерных и технико-экономических соображений. В Правилах устройства должны быть даны только общие направления. Некоторые уточнения в определение категорий потребителей внести желательно.

Уралэнергомонтаж сомневается в целесообразности нормировать для горных районов, при отсутствии метеорологических наблюдений, расчетную скорость ветра 35 *м/сек*. Эта скорость по мнению Уралэнергомонтажа соответствует всесокрушающему урагану. Высказанное сомнение основано, по нашему мнению, на недоразумении. В горных районах действительно наблюдаются очень большие скорости ветров. Ремонт линий в таких районах, в особенности в зимних условиях, крайне затруднен. В СССР построены линии, рассчитанные на давление ветра при скоростях 35—40 *м/сек*, подвергшиеся этим ураганным ветрам и не разрушенные ими.

Азэнерго, Тбилгидэп и Одесский энергокомбинат считают необходимым внести в Правила устройства воздушных линий указание о подвеске на линиях вблизи морей только медных проводов. Тбилгидэп предлагает принять зоной действия морей полосу побережья шириной 6 *км*. Пожелание этих организаций нужно считать правильным; подвеска на линиях вблизи морей только медных проводов предписывается решением техотдела МЭС.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Электротехническая секция Ростовского отделения ВНИТОЭ ставит вопрос о запрещении применения алюминиевых проводов на линиях класса I, основываясь на том, что провода из чистого алюминия дают большую вытяжку и потому могут применяться только на линиях с малыми пролетами. Одновременно предлагается указать, какие сплавы алюминия могут быть допущены на линиях класса I.

Автором этой статьи в работах «Выбор проводов в районах с сильными и особо сильными гололедами» (1934 г.) и «Технические условия для воздушных линий сильного тока в районах с особо сильными гололедами» (1938 г.) было показано, что эксплоатационный запас прочности алюминиевых проводов при одинаковом номинальном коэффициенте запаса прочности действительно меньше, чем для медных и сталеалюминиевых проводов. Однако это не дает основания для запрещения применения алюминиевых проводов на линиях класса I.

В Ростовской области наблюдаются интенсивные гололеды, которые сопровождаются ветрами от 3 до 8 баллов. Недоучет интенсивности гололедообразований и скорости ветра при нем могут привести к остаточной вытяжке провода и увеличению стрел провеса провода против расчетных. Повышение эксплоатационного запаса прочности алюминиевого провода возможно двумя путями: уменьшение длины пролета провода и снижение допускаемого напряжения материала провода. Первый путь — уменьшение пролета—очень невыгоден. Экономически значительно более целесообразным является снижение допускаемого напряжения, что при необходимости и может быть выполнено. Можно согласиться с Ростовским отделением ВНИТОЭ о нецелесообразности строительства линий с алюминиевыми проводами в районах с особо сильными гололедами, но нельзя считать правильным их предложение об отказе от алюминиевых проводов для линий класса I, большинство которых сооружается в районах с климатическими условиями, несравненно более легкими, чем в Ростовской области.

Очень серьезным вопросом является допустимость применения алдрея для линий класса I. Этот материал имеет высокое временное сопротивление и очень малую устойчивость против вибраций. Последнее подтверждается лабораторными испытаниями и эксплоатационными наблюдениями. Имеются сведения, что надежная работа этого провода может быть получена только при номинальном запасе прочности порядка 3—4. Большая неопределенность в работе алдреевых проводов заставляет, по нашему мнению, отказаться от рекомендации подвески этих проводов на линиях класса I. Отметим, что строительство линий с алдреевыми проводами, имеющими номинальный коэффициент запаса прочности около 3, не дает никаких экономических преимуществ перед линиями с медными и сталеалюминиевыми проводами. При коэффициенте запаса прочности 4, линии с проводами из алдрея будут иметь худшие экономические показатели. Приведенные соображения позволяют сделать вывод, что нашим заводам выпуск алдреевых проводов следует прекратить.

Правильное замечание делает Тбилгидэп, указывая, что примечание к § 22 Правил отредактировано неверно. По этому примечанию при наличии значительной разницы высот точек подвеса провода, в высшей точке его допускается снижение коэффициента запаса прочности на 10%, по сравнению с линиями, имеющими одинаковую высоту точек подвеса провода. В горных районах, как правило, провод имеет разную высоту точек подвеса в анкерном пролете. При учете примечания к § 22 получим, что линии в горных районах будут иметь меньший коэффициент запаса прочности, чем в равнинных местностях. Это противоречит логике, поскольку, учитывая трудности при ремонтных работах и тяжелые метеорологические условия в горных районах, можно было бы говорить о необходимости повышения, а не понижения в них коэффициента запаса прочности.

Предложение электротехнической секции РОНИТОЭ о необходимости изменить редакцию § 31, а именно считать возможным допускать, а не рекомендовать выпускающие зажимы, не может быть принято, как противоречащее современной практике строительства воздушных линий в Советском Союзе. Опыт эксплоатации показал вполне удовлетворительную работу выпускающих и скользящих зажимов. В то же время выпускающие зажимы позволяют значительно облегчить промежуточные опоры. Возможность применения выпускающих зажимов в районах с сильными гололедами должна быть обсуждена в каждом отдельном случае. Автор этой статьи и доц Г. М. Розанов в работе «Технические условия для воздушных линий сильного тока в районах с особо сильными гололедами» показали, что при определенных условиях выпускающие зажимы могут применяться и в гололедных районах.

Целый ряд организаций и инженеров представили замечания по разделам «Типы опор, область их применения и схемы расчета опор», «Металлические опоры» и «Деревянные опоры».

Энергосбыт Днепроэнерго правильно указывает на отсутствие в Правилах нормирования расчетов железобетонных опор и стульев (пасынков). Учитывая большой экономический эффект от применения железобетонных стульев к деревянным опорам и целесообразность в отдельных случаях сооружения железобетонных опор, необходимо Правила устройства линий электропередачи пополнить разделом «Железобетонные опоры».

По справедливому замечанию инж. С. С. Блинкина из Харькова, Правила устройства воздушных линий содержат непоследовательность в принятых установках, а также, в некоторой части противоречат существующим «Нормам проектирования деревянных конструкций (Н-2-46) изд. 1947 г. и «Нормам и техническим условиям проектирования стальных конструкций» (Н и ТУ-1-46) изд. 1947 г. Эти нормы предусматривают разные допускаемые напряжения в стали и в дереве, в зависимости от учета только основных или основных и дополнительных нагрузок. Для стали марки СТ-2 для основных нагрузок нормировано допускаемое напряжение 1 400 *кг/см*², а при учете дополнительных нагрузок — 1 600 *кг/см*². Для сосны соответственно допускаемые напряжения составляют 100 и 120 *кг/см*².

В Правилах устройства электротехнических установок при воздействии на опору основных и дополнительных нагрузок для стали марки СТ-2 допускаемое напряжение установлено 1 400 *кг/см*², а для сосны на изгиб 120 *кг/см*². Таким образом, металлические опоры рассчитываются по напряжениям, допускаемым при воздействии только основных нагрузок, а деревянные — по допускаемым напряжениям для основных и дополнительных нагрузок. Эта несогласованность не может быть оправдана и должна быть устранена.

Инж. С. С. Блинкин обращает также внимание, что в нормах проектирования деревянных конструкций предписывается допускаемые напряжения снижать на 15%, если конструкция подвергается переменному увлажнению, и на 25%, если конструкция или отдельные элементы ее длительно находятся в увлажненном состоянии. Учета увлажнения древесины в Правилах устройства воздушных линий не сделано. Инж. С. С. Блинкин отмечает, что при расчетах деревянных опор для линий контактной сети электрифицированных железных дорог, трамваев и троллейбусов, снижение допускаемых напряжений из-за увлажнения древесины производится.

Автор этой статьи в журнале «Электричество», № 12, 1949, опубликовал веские возражения против расчета пропитанных и непропитанных антисептиками деревянных опор с одним допускаемым напряжением. Допуск одних и тех же напряжений для пропитанной и непропитанной древесины не может быть оправдан с эксплоатационной точки зрения и приведет к необоснованному большому расходу древесины на линиях с непропитанной древесиной.

Ростовское отделение ВНИТОЭ правильно указывает на необходимость дать допускаемые напряжения для сосны третьего сорта.

Инж. Г. А. Шишкин из Ленгидэпа предлагает новую расчетную схему для промежуточных опор. По его предложению опоры рассчитываются только при нормальных режимах работы линии, причем в одну из этих схем вводится кроме поперечных нагрузок, продольная нагрузка, учитывающая в упрощенном виде влияние обрыва одного провода. Величина этой силы определяется в зависимости от сечения и материала провода линии. Например, для линии с медными проводами сечением 70 *мм*² предлагается принять продольную силу равной 280 *кг*. По нашему мнению это предложение принято быть не может. При составлении норм расчета проводов и опор всегда стремились дать расчетные схемы, отвечающие действительным условиям работы линий. Введение условных, формальных моментов,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

даже облегчающих расчетную работу, не допускалось. Продольное усилие, при нормальных режимах работы линии, зависящее от сечения провода и от материала его, физически оправдано быть не может.

Усилие вдоль линий 35—110 *кв* с медными проводами 70 *мм*², при обрыве одного провода будет в 2—3 раза больше предлагаемого инж. Шишкиным; сказанное относится к глухим подвесным зажимам.

Военпроект (г. Киев) предлагает разработать подробнее Правила, касающиеся сближений и пересечений воздушных линий электропередач с линиями связи, аэродромами, бензобаками, складами взрывчатых веществ. Кроме того, эта организация выражает сомнение в возможности прокладки воздушных линий по территориям хранилищ взрывоопасных и пожароопасных веществ и рекомендует в этих случаях прокладку кабельных линий.

Нам представляется, что дальнейшее уточнение требований для различных специальных случаев строительства линий вряд ли целесообразно. Особенности различных объектов могут быть учтены только при конкретном проектировании и не могут быть установлены в общих правилах.

Переходя к рассмотрению замечаний по Правилам устройства воздушных линий до 1 000 *в* остановимся на замечаниях энергосбыта Ленэнерго. В них предлагается запретить применение на линиях однопроволочных проводов из алюминия. Опыт эксплоатации Ленэнерго показал ненадежность работы таких линий, имея в виду частые обрывы проводов из-за усталости металла, вызванной вибрациями. Энергосбыт Ленэнерго считает необходимым запретить применение однопроволочных алюминиевых проводов и для вводов. Представляется, что предложения энергосбыта Ленэнерго являются достаточно обоснованными, так как разрушение однопроволочных алюминиевых проводов может происходить по целому ряду причин.

Эта же организация считает нужным запретить совместную прокладку линий с напряжениями до и выше 1 000 *в*, как затрудняющую эксплоатацию сети. С этим предложением согласиться нельзя, учитывая, что Правила допускают совместную прокладку линий до 1 000 *в* и выше 1 000 *в* только в исключительных случаях. Если не переходить на кабельную сеть, то в ряде случаев без совместной прокладки линий разного напряжения обойтись нельзя. Следует рассмотреть более жесткую редакцию § 51 Правил, указав в нем, что совместная прокладка линий до 1 000 *в* и выше 1 000 *в* может быть допущена, если никакого другого решения предложено быть не может.

Серьезное внимание должно быть уделено предложению энергосбыта Ленэнерго о допустимости крышевых прокладок. Энергосбыт Ивэнерго вносит предложение о прокладках линий на кронштейнах.

В городах-садах, например в Алма-Ата, прокладка линий вдоль улиц приводит к большому числу нарушений работы сети. Обледенелые ветви деревьев ложатся на провода, замыкают их и обрывают. Бывали случаи, когда при одном обледенении происходило несколько десятков обрывов проводов. Энергосбыт Ивэнерго указывает, что в ряде случаев устройство вводов из-за зеленых насаждений практически осуществлено быть не может.

Челябинская кабельная сеть вносит предложение о недопустимости установки опор из бревен с диаметром в отрубе менее 16 *см*. По Правилам допускается применение бревен с диаметром в отрубе 14 *см*. Мотивами для такого решения электросеть Челябэнерго считает удобство работы монтера на опоре и частую смену бревен. Применение бревен с диаметром 14 *см*, безусловно, не может быть оправдано народно-хозяйственной экономикой. Экономия получается на бумаге при составлении проекта. При эксплоатации линий с такими малыми диаметрами бревен использование древесины будет крайне низким и стоимость ремонтных работ очень высокой. Указанные положения были с очевидностью доказаны автором в статье «Новые принципы расчета и конструирования деревянных опор», опубликованной в журнале «Электрические станции», № 8, 1943.

Электротехническая секция Ростовского отделения ВНИТОЭ считает необходимым дать в Правилах устройства линий до 1 000 *в* нормы расчета металлических опор, поскольку для таких линий применяются решетчатые и трубчатые металлические опоры.

◇ ◇ ◇

Всесоюзное научное инженерно-техническое общество энергетиков (ВНИТОЭ) проводит с 9 по 13 октября 1950 года в Ленинграде научно-техническое совещание по рассмотрению Всесоюзных правил устройства электротехнических установок, разработанных Техническим управлением и Государственной инспекцией по промэнергетике и энергонадзору Министерства Электростанций СССР и Главэлектромонтажем Министерства Строительства промпредприятий тяжелой индустрии СССР.

По всем вопросам, связанным с проведением совещания, обращаться по адресу: Ленинград—25, Стремянная ул. 10 — ВНИТОЭ.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Хроника

Конференция авторов журнала „Электричество“

18 мая 1950 г. в Москве была проведена однодневная конференция авторов журнала «Электричество». Предложение о созыве авторской конференции в связи с поднятым на прошедших читательских конференциях рядом вопросов было выдвинуто редакцией журнала и поддержано Правлением Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетиков, поручившим МОНИТОЭ принять организационное участие в этом мероприятии журнала.

Председатель Комитета по научно-технической пропаганде МОНИТОЭ **П. И. Воеводин** во вступительном слове кратко изложил основные задачи, стоящие перед участниками конференции и отметил ответственную роль старейшего русского электротехнического журнала «Электричество» в воспитании кадров советских электротехников и в разработке ведущих проблем электрификации народного хозяйства Советского Союза.

Председатель МОНИТОЭ проф. **Б. А. Телешев** предоставил слово для доклада редактору журнала «Электричество» проф. **Г. Н. Петрову.**

Сегодняшняя встреча с авторами, — сказал Г. Н. Петров — является естественным следствием прошедших в 1948 и 1949 гг. встреч редакции с читателями журнала на конференциях в Москве, Киеве, Ленинграде, Свердловске. Читатели с большим вниманием относятся к журналу. Их оживленные выступления на всех конференциях по вопросам деятельности журнала критически заострили целый ряд важных проблем, которые должны быть рассмотрены авторами журнала и должны получить свое правильное разрешение для дальнейшего успешного развития журнала «Электричество». Мнение и критика читателей постоянно учитываются редакцией, с ней обязаны считаться и авторы, так как для читателей издается журнал, и от того, насколько удовлетворяются запросы читателей, зависит успех или неудача издания журнала. Наряду с актуальными, важными для советских электротехников статьями в журнале до недавнего времени находили место также отдельные статьи на сугубо отвлеченные темы, неизвестно кого, кроме автора и исключительно узкого круга специалистов, интересующие и неизвестно кому, кроме автора и, может быть, отдельных читателей, приносящие практическую пользу. С этим — подчеркивает Г. Н. Петров — должно быть решительно покончено. Справедливо отметить, что удельный вес отвлеченных статей в самое последнее время резко сократился — читательские конференции 1948 — 1949 гг. принесли свои плоды, но задача дальнейшей борьбы за практическую направленность содержания, за актуальные, жизненные темы, за статьи, практически помогающие читателям расти, осваивать передовую советскую техническую мысль, эта задача не снята. Наоборот, сейчас, в преддверии грандиозных работ по дальнейшей электрификации нашей страны, она приобретает еще более серьезное значение. Ответственность за успешное разрешение этой почетной задачи журнала помимо его редакционной коллегии несет многочисленный творческий коллектив авторов, тесно связанный с журналом «Электричество» на протяжении ряда лет. На это обстоятельство указывалось уже в обращении редакции к авторам, опубликованном в № 4 журнала (стр. 72).

Необходимо еще раз пояснить, что речь идет не о снижении научно-технического уровня содержания материалов журнала, а исключительно об актуальности тематики и о форме изложения статей. В журнале должны постоянно сочетаться научная ценность и практическая направленность содержания с тем, чтобы читатель легко пользовался результатами выполненных автором исследований и расчетов. Наряду с инженерными статьями в журнале систематически будут печататься и теоретические статьи, но они должны быть написаны таким образом, чтобы чтение их не представляло излишних трудностей. Теоретические работы следует, как правило, иллюстрировать конкретными примерами; анализ должен быть доведен до числа.

Г. Н. Петров в заключении доклада остановился также на ряде других задач, приглашая авторов уделить больше внимания составлению обзорных статей, активнее участвовать в проводимых на страницах журнала дискуссиях, которые способствуют более полному разбору теоретических и инженерно-технических вопросов, поднятых в статьях, включиться в работу по упорядочению электротехнической терминологии и т. д.

Обращаясь к роли, которую может сыграть ВНИТОЭ в повышении качества журнала, Г. Н. Петров указал на желательность систематического критического обсуждения в организациях ВНИТОЭ основных статей журнала.

Г. Н. Петров призвал авторов журнала в своей работе руководствоваться задачей партийного изложения материалов, до конца изжить остатки элементов низкопоклонства перед техникой капиталистических стран, отражать, как можно глубже, достижения отечественной науки и техники.

Доктор техн. наук, проф. **В. Ю. Ломоносов** (МЭИ им. Молотова), выражая удовлетворение по поводу созыва авторской конференции и поддерживая выдвинутые редакцией журнала в докладе Г. Н. Петрова предложения, сообщил, что ему, как одному из рецензентов журнала, приходится в ряде случаев встречаться с разновидностью консерватизма, проявляемого, к сожалению, многими авторами при составлении своих статей. Пройдя нелегкий и долгий путь в своих исследованиях, после затраты, как это часто бывает, излишнего труда для установления завершающих работу выводов, они заполняют свою статью изложением ненужных с точки зрения стройности и ясности изложения разрешенной ими задачи подробностей. Нет никакого основания вести читателей по сложному пути выполненных исследований. Часто в статьях встречаются формулы, которые не могут служить полезной цели, хотя бы потому, что они не могут быть доведены до численного выражения. Мне представляется — заметил В. Ю. Ломоносов, — что число таких формул сократилось бы, если бы авторов, увлекающихся ими, заставить производить расчеты по их собственным формулам. Что касается отдельных сложных теоретических работ, к которым проявляет законный интерес пусть лишь ограниченная группа читателей, то лишать их такого материала не следует. Желательно, в связи с тем, что в журнале стало тесно (разрослась электротехническая тематика), наряду с многотиражным основным изданием журнала «Электричество» начать выпуск малотиражной серии журнала «Электричество», в которую можно было бы относить все сложные теоретические работы, имеющие важное научное значение и сулящие в дальнейшем их развитии и практическом воплощении безусловные выгоды для советской науки и техники и социалистического строительства нашей Родины.

Член-корр. АН СССР, проф. **М. П. Костенко** (ЛПИ им. Калинина) обратил внимание конференции на не вполне

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

удовлетворительную подготовку статей многими авторами журнала. Весьма значительное число статей, представляемых в журнал, является наспех перекомпонованными материалами диссертаций. Вообще это неплохо, что авторы диссертаций стремятся отразить их в журнале, но они не должны при этом забывать, что не все то, что подходит для диссертационной работы, может представлять интерес в статье. Я утверждаю, — сказал М. П. Костенко, — что почти 80% любой диссертационной работы следует опустить при желании написать по ней интересную статью для журнала «Электричество». Однако, к сожалению, не все авторы это понимают и соблюдают. В итоге редакция журнала получает часто сырой материал и самый компетентный рецензент, беря в руки такую статью, затрачивает уйму времени, пока найдет в ней то зерно истины, ту новизну, ради которой, собственно, стоит печатать статью. В результате — возврат статьи автору для переработки, затем новое рассмотрение; уходят месяцы, пока такая статья увидит свет. Автор не считает себя виновным, а во всем винит редакцию и рецензентов.

При работе над статьей автор должен ощущать запросы времени, темпы жизни; необходимо, чтобы кругозор автора и характер вопросов, затрагиваемых в статье, не были чрезмерно узкими, «на любителя»; автор должен знать смежные области. Рецензии о новых книгах надо писать так, чтобы читатели, еще не знакомые с рецензируемой книгой, получали из рецензии общее представление о ней, а то нередко в рецензии мы находим только набор частных критических замечаний и перечень опечаток, а общей картины книги не имеем.

В заключение выступления М. П. Костенко остановился на работе первичных организаций ВНИТОЭ, отметив как большой пробел их деятельности то, что они очень редко проводят обсуждение журнальных статей. Лучше всего роль научно-технической общественности была бы проявлена, если бы первичные организации ВНИТОЭ повсеместно и регулярно обсуждали подготовленные авторами для журнала «Электричество» статьи, которые затем автор соответственно бы улучшал и передавал в журнал вместе с данными состоявшегося общественного просмотра.

Кандидат техн. наук **И. С. Бессмертный** (Трест «Коммунэнергопроект») рекомендовал авторам усилить внимание к статьям обзорного характера, которые представляют, как правило, широкий интерес. Касаясь порядка подготовки редакцией статьей в печать, И. С. Бессмертный предложил редакции строго соблюдать такой порядок, при котором рецензент, потребовавший переработки автором статьи, получал бы на заключительный просмотр последний вариант статьи, иначе возможны недоразумения, примером которых может служить напечатанная в № 4 журнала за 1950 г. статья Е. Н. Приклонского «Выбор числа трансформаторных подстанций». Рассмотрев по поручению редакции эту статью, И. С. Бессмертный внес предложение о некотором расширении ее ввиду актуальности темы. Переработанная и дополненная статья не была показана рецензенту, который, увидев ее в № 4 журнала, нашел, что переработка статьи была выполнена не в том направлении, в каком это представлялось необходимым.

Кандидат техн. наук **Ю. М. Галонен** (АКХ им. Памфилова), соглашаясь с постановкой вопросов в докладе редактора журнала, признал, что авторы должны еще очень многое сделать, чтобы усовершенствовать форму изложения своих научных работ. Мы должны постоянно чувствовать, — сказал Ю. М. Галонен, — перед собой читателей журнала — научных работников, инженеров-электриков проектных, монтажных организаций, производственников электромашиностроения, инженерно-технический персонал электростанций, преподавателей втузов и т. д. и не забывать, что статьи мы пишем для них.

Доктор техн. наук, проф. **В. Е. Розенфельд** (МЭИ им. Молотова) добавил: «мы — авторы, к сожалению, больше думаем о себе, в то время как в первую очередь следует думать о нашем читателе». Нельзя, конечно, требовать, чтобы читатель, работающий в узкой области, например, автоматического регулирования генераторов на тепловозах, интересовался например, специальными статьями по электрификации сельского хозяйства или статьями по электротермии и др. Однако требование, чтобы читатель, работающий в области, близкой к теме статьи, легко ее читал, такое требование обязательно для всех авторов. Что касается вопроса полезности той или иной статьи, то суждение об этом редакция журнала должна выносить со всей необходимой строгостью. Нельзя печатать неинтересную или тяжело написанную статью ни при каких условиях, никаких скидок «на автора» редакция делать не вправе и замечание докладчика о том, что отдельные напечатанные в журнале «Электричество» статьи не удовлетворяют редакцию журнала «Электричество», непонятно. Если статья после всех замечаний рецензента и редакции не приведена автором в надлежащий вид, такая статья не должна печататься.

Доктор техн. наук **Л. Б. Гейлер** (Лаборатория электропривода) считает, что к тем напряженным усилиям, которые успешно прилагает редакция для улучшения старейшего отечественного электротехнического журнала, должны присоединиться все авторы; к голосу читательских масс авторы должны прислушиваться и сделать соответствующие выводы. Л. Б. Гейлер привел ряд примеров неудовлетворительно написанных статей. Об актуальности и неотложности разрешения задачи, поставленной читателями и редакцией, свидетельствует тот нелестный для авторов и редакции журнала факт, что № 4 журнала, в котором было опубликовано известное обращение редакции к авторам, изобилует статьями, содержание которых находится в диаметральной противоположности к требованиям, перечисленным в обращении редакции. Авторам, безусловно, следует перестроиться, но это обстоятельство не снимает большой ответственности с редакционной коллегии журнала; редакция должна строже и глубже подходить к отбору статей.

Проф. **С. А. Бургучев** (МИМЭСХ) указал на долг всех рецензентов, которых редакция привлекает к рассмотрению статей, глубже и детальнее анализировать материал, не ограничиваясь поверхностными короткими оценками, а обстоятельными заключениями помогать автору, рекомендуя ему конкретные пути для улучшения статьи.

Инж. **Е. Н. Приклонский** (ГИАП МХП) заострил внимание авторов на вопросах экономики, которые обязательно должны учитываться в инженерно-технических статьях. Касаясь рецензирования статей, поступающих в редакцию, Е. Н. Приклонский выразил пожелание, чтобы редакция чаще устраивала встречи рецензентов с авторами, такие встречи могут обеспечить более плодотворные результаты в борьбе за качество материалов.

П. И. Воеводин (МОНИТОЭ), приветствуя предложение ввести практику предварительного общественного просмотра статей, обратился к авторам с просьбой проявить инициативу в этом отношении и внести соответствующие конкретные предложения в свои первичные организации, которым МОНИТОЭ даст надлежащие указания.

Доктор техн. наук, проф. **В. Н. Мильштейн** (МГИМИИП) предложил, чтобы связи редакции с авторами был придан организованный характер, чтобы встречи периодически повторялись в дальнейшем. На совещаниях с авторами редакция должна обсуждать тематические вопросы и научно-технические проблемы (собирая авторов по группам).

Инж. **А. И. Фюрстенберг** обратил внимание на чрезмерно длительные сроки нахождения статей у рецензентов.

Инж. **А. А. Ермилов** (Центроэлектромонтаж) выразил удовлетворение созывом настоящей конференции и указал на важность поставленных вопросов. Остановившись затем на вопросах организации в журнале дискуссий, А. А. Ермилов рекомендовал наряду с общим извещением читателей о намеченной по статье дискуссии направлять основным кадрам специалистов соответствующей области приглашения выступить в дискуссии.

В выступлениях авторы единодушно поддерживали обращение редакции журнала. Это отметил в заключительном слове проф. Г. Н. Петров. На конференции была принята резолюция, в которой отмечается, что перед редакционной коллегией журнала и его авторским коллективом стоит задача дальнейшего повышения качества журнала. Участники конференции одобрили инициативу редакции журнала «Электричество», Правления ВНИТОЭ и МОНИТОЭ по созыву первой авторской конференции журнала нашли целесообразным периодически проводить такие конференции для рассмотрения вопросов повышения

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

качества материалов, подготовляемых для журнала «Электричество».

К сведению и руководству были приняты сообщенные в докладе Г. Н. Петрова предложения и пожелания читателей журнала на четырех читательских конференциях в Москве, Киеве, Ленинграде и в Свердловске в 1948 и 1949 гг. Критические замечания читателей в отношении ряда опубликованных в истекшие годы статей признаны авторской конференцией правильными.

Основным условием для статьи, представляемой в журнал «Электричество», участники конференции считают совмещение в ней научной ценности и практической направленности содержания, а также возможность использования читателями в их инженерной и научной деятельности результатов, выполненных автором исследований и расчетов. Статьи, подготовленные авторами для журнала, должны отражать новейшие достижения науки и техники и передовой опыт промышленности и других отраслей народного хозяйства Союза ССР. Для ускорения опубликования статей в печати и для охвата в каждом номере журнала возможно большего числа актуальных тем необходимо более строгое соблюдение авторами предусмотренных Правилами журнала указаний о размерах представляемых в журнал «Электричество» рукописей.

Конференция призвала всех авторов журнала руководствоваться в дальнейшей творческой работе над материалами для журнала принятыми на конференции решениями. (см. обращение редакции на стр. 75).

С большим подъемом участники конференции приняли текст приветственного письма товарищу Сталину.

Д. Р.

◇ ◇ ◇

Авторефераты диссертаций

В редакцию журнала «Электричество» поступили перечисленные ниже авторефераты диссертаций *на соискание степени кандидата наук.*

Г. П. Абрамович — Статические преобразователи частоты (МЭМИИТ).

В. Л. Бенин — Выпрямительно-дроссельная система автоматического регулирования активной мощности генераторов (ИЭЛ АН УССР).

Н. Г. Ганиходжаев — Анализ работы схем отбора малых мощностей от высоковольтных линий электропередачи (ЭНИН АН УзССР)).

М. З. Жиц — Исследование самовозбуждения сериесных тяговых электродвигателей на подвижном составе городского транспорта при реостатном торможении (АКХ).

И. А. Захария — Методика экспериментального исследования погрешностей выпрямительных приборов по форме кривой (Львовский ПИ).

М. Е. Иерусалимов — Профилактические испытания аппаратных изоляторов в энергосистемах методом рентгенодефектоскопии (КПИ).

Л. М. Кононович — Вопросы теории и расчета генераторов с реостатно-емкостной настройкой (ЛПИ).

П. Л. Литвин — Аналитический расчет удельных расходов электроэнергии для главных приводов прокатных станов и влияние разных факторов на их величину (ЛПИ).

Л. С. Мелодиев — Повышение точности одновитковых измерительных трансформаторов тока дополнительным намагничиванием полем повышенной частоты (ЭНИН АН УзССР).

А. В. Рубчинский — Восстановление пробивной прочности после искрового разряда (ВЭИ).

А. С. Семенов — Методика расчета электронных усилителей мощности, используемых в устройствах электроавтоматики (МАИ).

Б. А. Филиппов — Исследование электромашинной системы управления возбуждением генератора реверсивного электропривода (МЭИ).

Е. В. Чуприянов — Исследование параллельной работы сельсинов (ИНЭН АН КазССР).

Д. М. Шахрай — Исследование специальной системы электрооборудования экскаватора (УралПИ).

◇ ◇ ◇

О золотой медали имени А. С. Попова

Президиум Академии наук СССР объявляет о конкурсе на соискание золотой медали имени А. С. Попова, присуждаемой за выдающиеся научные работы и изобретения в области радио.

Право на соискание медали имени А. С. Попова имеют как советские, так и зарубежные ученые.

Работы, законченные в 1950 г., могут представляться научными обществами, научно-исследовательскими институтами, высшими учебными заведениями, ведомствами, общественными организациями и отдельными гражданами на любом языке в трех экземплярах, напечатанных на пишущей машинке или типографским способом.

К работе должны быть приложены отзывы организаций, представляющих работу на соискание медали, о научной ценности и значении работы для развития радио и краткие биографические сведения об авторе с перечнем его основных научных работ и изобретений.

Срок представления работ — не позже 1 февраля 1951 г.

Работы с надписью *«На соискание золотой медали имени А. С. Попова»* направлять в Совет по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР — Москва, 3-я Миусская ул., д. 3.

Справки по телефону Д 1-03-68.

Президиум Академии наук СССР

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Библиография

Л. Е. ЭБИН и Ш. М. АЛУКЕР. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗЕМЛИ В КАЧЕСТВЕ ОДНОГО ИЗ ФАЗНЫХ ПРОВОДОВ (ДВА ПРОВОДА—ЗЕМЛЯ). 68 стр., ц. 2 руб. 75 коп. Госэнергоиздат, 1949.

Широкое развитие сельской электрификации обусловливает повышенный интерес к вопросу об электрическом расчете сетей с использованием земли в качестве одного из фазных проводов (ДП-З). Выпущенное Л. Е. Эбиным и Ш. М. Алукером в 1940 г. «Руководство по электрическому расчету трехфазных сетей с использованием земли в качестве одного из проводов» стало библиографической редкостью; кроме того, в ряде вопросов требовалась коренная переработка этой книги на основе новых Руководящих указаний. Поэтому следует приветствовать издание рецензируемой книги тех же авторов. В этой книге в доступной и сжатой форме изложены основные моменты проектирования сельских высоковольтных сетей по системе ДП-З.

Однако, имея в виду растущий спрос на подобное пособие, вышедшее и в настоящем издании довольно ограниченным тиражом, нельзя не остановиться на некоторых пожеланиях к последующим выпускам этой книги.

Таблицы «Распределение сетей ДП-З по рабочим напряжениям» и «Распределение сетей ДП-З по источникам питания» (стр. 5) являются повторением таблиц издания 1940 г. Абсолютные величины протяженности сетей обеих таблиц в настоящее время теряют свой смысл, так как в послевоенное время сельскохозяйственные сети ДП-З значительно разрослись. Было бы рациональнее оставить в названных таблицах только процентные графы, прокорректированные по состоянию на момент выпуска пособия.

Краткие сведения по асимметрии токов и напряжений в сетях ДП-З (стр. 19—20) значительно сокращены по сравнению с редакцией 1940 г. Отсутствует формула асимметрии напряжений при симметричной нагрузке. Так как книга рассчитана и на техников, не лишним было бы напомнить, что знак // в формулах (7) и 10) является знаком модуля комплексного выражения, а также указать, как подсчитываются сопротивления прямой и обратной последовательности в случае осветительной, двигательной и смешанной нагрузки.

В главе «Расчет токов короткого замыкания» (стр. 26) приведены кривые затухания периодической слагающей тока короткого замыкания для типового гидрогенератора с автоматическим регулятором напряжения. В практике строительства сельскохозяйственных гэс очень часто приходится встречаться с генераторами малой мощности без автоматических регуляторов напряжения. Очень желательно приведение наряду с кривыми затухания для типовых турбо- и гидрогенераторов с автоматическим регулятором кривых затуханий для гидрогенераторов без такого регулятора. Нельзя считать удачным пример расчета токов короткого замыкания, приведенный на стр. 24—29 (для линии с проводом М-35). Руководящие указания по проектированию объектов сельской электрификации Главсельэлектро 1949 г. указывают в § 148, что «Расчет линий передачи высокого напряжения должен производиться с учетом максимального применения железных проводов (сплошных и витых), допуская в виде исключения применение проводов из цветных металлов. Применение медных проводов сечением свыше 16 *мм*² не допускается». Между тем расчет токов короткого замыкания в сетях с железными проводами обладает спецификой, недооцениваемой некоторыми проектировщиками. Необходимо поэтому привести в главе по расчету токов короткого замыкания ДП-З пример со стальными проводами.

В главе 5 даются условия расчета заземлений. Эта глава коренным образом переработана по сравнению с изданием 1940 г., согласно действующим «Правилам устройства заземлений в электрических установках сильного тока напряжением выше 1 000 *в*» и «Руководящим указаниям Главсельэлектро». Без объяснений приводится на стр. 30 третье требование по выбору сопротивлений заземлений подстанций и трансформаторных пунктов в сетях ДП-З. Между тем это требование нуждается в дополнительном разъяснении. Например, величина общего заземления сельского трансформаторного пункта напряжением 6—10 *кв* при мощности трансформаторного пункта до 30 *кв* и питании от гэс мощностью до 300 *ква* по условиям безопасности и по защитному действию оказывается значительно выше 4 *ом*. Вместе с тем в условиях горных грунтов осуществление заземления подстанции ДП-З в 4 *ом* связано со значительными техническими и экономическими трудностями. Поэтому желательно получить достаточно обоснованное третье требование по выбору заземлений подстанций и трансформаторных пунктов в сетях ДП-З с дифференцированным подходом к мощности подстанций и гэс на каждом напряжении.

На стр. 5 приведена таблица «Кажущиеся удельные проводимости земли для местностей со слоистой структурой земли в зависимости от частоты тока». На эту таблицу есть также ссылка на стр. 41. Таблица охватывает 4 ограниченных района СССР. Желательно указать, какими расчетными формулами пользоваться в других районах СССР, в частности, в горных районах. Также желательно указать, как получена функциональная зависимость удельной проводимости от $\sqrt{f}$.

На стр. 39—41 приводятся схема и метод измерения проводимости земли. Следовало бы предупредить читателей о пределах применимости этого метода измерений, класса точности приборов в схеме и возможных погрешностях. Приведенный пример на стр. 40 не дает представления о возможных затруднениях. Например, в горных местностях, где приходится иметь дело с плечом передачи в $3 \div 5$ *км*, применение стальных проводов вместе с заземлением на концах передачи приводит к очень высокой величине $\cos\varphi$ при опыте короткого замыкания. Таким образом, в формуле (33) подкоренная разность обладает настолько большой относительной погрешностью, что полученное значение сопротивления индуктивности петли провод—земля на 1 *км* способно совершенно исказить фактическую кажущуюся удельную проводимость грунта, определяемую из достаточно сложной зависимости от x_l (рис. 10, стр. 17).

К сожалению, в книге отсутствует библиография. Сноски на использованную литературу на некоторых страницах не охватывают всех вопросов, на которых не позволил детальнее остановиться ограниченный объем книги. Желательно в следующем издании восполнить этот пробел.

В заключение остается пожелать, чтобы в следующем издании книга вышла большим тиражом для использования ее периферийными работниками сельской электрификации.

Кандидат техн. наук Л. М. ВИЛЬЧУР
Лаборатория электротехники АН Армянской ССР

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(Издания 1950 г.)

АБАЗА С. А. ТЕХНОЛОГИЯ ПОТОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ МОЩНОСТЬЮ ДО 10 *квт*. 160 стр. + вклейка, ц. 10 руб. Госэнергоиздат.

ВАРДЕНБУРГ А. К. ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ В ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ. 192 стр., ц. 11 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Пластические массы получают все более широкое применение в электропромышленности — в производстве электрических аппаратов, приборов, машин и т. п. как для целей электрической изоляции, так и для конструктивных деталей, для защитных покрытий и пр. Книга А. К. Варденбурга, входящая в большую серию книг и брошюр по электрической изоляции, составляемых по инициативе Всесоюзного бюро электрической изоляции, содержит хорошо подобранный и систематизированный материал по вопросам конструирования из пластмасс изделий преимущественно электротехнического назначения; специальный раздел посвящен коллекторам электрических машин. Большое внимание уделяется выбору и конструированию прессформ и процессам формования пластмасс, а также вопросам обработки прессованных изделий и их испытанию. Дается также обзор свойств как термореактивных, так и термопластичных пластмасс, применяемых в электромашиностроении и других областях электропромышленности. В книге содержатся ценные практические указания о деталях конструкций прессформ и пластмассовых изделий, о технологии и режимах прессования, о причинах брака пластмассовых деталей и способах его устранения. К книге приложен указатель 135 литературных источников.

ВИНТЕР А. В. ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОВЕТСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. (Академия наук СССР. Научно-популярная серия). 36 стр., ц. 1 руб. Изд-во Академии наук СССР.

ГОРОДЕЦКИЙ С. С. ИСПЫТАНИЕ КАБЕЛЕЙ С ПРОПИТАННОЙ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ. 148 стр., ц. 5 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

В книге рассматриваются методы испытаний (определение размеров и механических свойств, измерение активного сопротивления, различные испытания электрических характеристик изоляции и пр.) силовых электрических кабелей с бумажной изоляцией, пропитанной вязкими составами. Излагаются как методы контроля качества кабелей на кабельных заводах, так и методы испытания проложенных кабельных линий; в соответствии с этим книга предназначена для инженерно-технических работников как кабельных заводов, так и энергосистем. В книге не рассматриваются методы испытания масла и газонаполненных кабелей, методы испытания свинцовых оболочек и методы определения мест повреждений в кабелях.

* **ГУЛЬДЕНБАЛЬК В. В., КАЕТАНОВИЧ М. М., РАБИНОВИЧ Д. В., РАПУТОВ И. И., ШМЕЛЕВ М. Н.** СООРУЖЕНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ. 528 стр., ц. 21 руб. Госэнергоиздат.

ДВОСКИН Л. И. РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. 144 стр., ц. 15 руб. Госэнергоиздат.

ЕПАНЕШНИКОВ М. М., СОКОЛОВ М. В. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ. Под редакцией **В. В. Мешкова.** Допущено в качестве пособия для вузов по электротехническим специальностям. 228 стр., ц. 9 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

Содержание книги соответствует программе курса «Электрическое освещение» и, наряду с освещением физических понятий, относящихся к светотехнике и теории теплового и люминесцентного излучения, отражает особо расширенный материал по проектированию и методам расчета осветительных установок. В виде приложения в книге приведены действующие в СССР нормы освещенности и др. практические вспомогательные таблицы по светотехнике. Совершенно недостаточным следует признать место, отведенное в книге истории электрического освещения: из 228 стр. исторические сведения содержат лишь пять стр. введения и полторы стр. во 2-й главе. Россия — родина электрического освещения; русскими открытиями и изобретениями в области светотехники воспользовался затем весь мир и было бы совершенно естественным в специальном учебнике по электрическому освещению найти более обширный материал по истории электрического освещения. После описания открытия В. В. Петрова в книге сразу упоминается об освещении дуговыми лампами Литейного моста в 1879 г., но ничего не сказано о деятельности А. И. Шпаковского, который еще в 1856 г. в Москве осуществил электрическое освещение сконструированными им дуговыми «электрическими солнцами». Касаясь роли В. Н. Чиколева, авторы упоминают об его автоматическом регуляторе и дифференциальной лампе (1873—1879 гг.), но не указали, что первые работы над дуговыми лампами Чиколева относятся еще к 1865 г. Совершенно непонятно игнорирование В. Н. Чиколева, как пионера военной светотехники и автора многочисленных печатных трудов по применению электрического освещения в боевых условиях. Русские войска и морской флот еще в войне 1877—1878 гг. успешно применяли против турецкого флота прожектора. Об оригинальных работах Чиколева в области прожекторной техники в книге также ничего не сказано, хотя прожекторам уделена в ней не одна глава. Несомненно разработанный Чиколевым фотографический метод поверки рефлекторов электрического освещения, подхваченный затем и за границей, заслуживал особого упоминания.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЭНЕРГОСБЫТА МОСЭНЕРГО. Декабрь 1949 г. К социалистическому соревнованию по экономии электроэнергии. 70 стр., бесплатно, Госэнергоиздат.

КУЗНЕЦОВ М. И. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Одобрено в качестве учебного пособия для профтехшкол., 271 стр., ц. 8 руб. 75 коп. Гострудрезервиздат.

ЛИТВАК Л. В. ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ $\cos\varphi$ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ. 116 стр., ц. 6 руб. Госэнергоиздат.

Рассматривается широко известный вопрос о борьбе за повышение коэффициента мощности электроустановок. Задача рационализации использования электроэнергии находится в центре внимания всех электроэнергетиков Советского Союза и данная книга, систематизирующая ряд практических сведений и технико-экономических расчетов в этой области, найдет читателей среди инженерно-технических работников энергоцехов всех отраслей промышленности и др. Тарифные мероприятия являются лишь частью тех мероприятий, которые должны влиять на улучшение $\cos\varphi$ и снижение потерь электроэнергии. Вместе с тем точный и полный учет разнообразнейших факторов, регулирующих этот процесс рационализации электроиспользования, не всегда может быть выполнен быстро и легко. В связи с этим опыт подсказывает более простой практический путь расчетов, базирующихся на использовании экономического эквивалента реактивной мощности, и заключающийся в определении экономии активной мощности (энергии) при улучшении $\cos\varphi$ как разности между экономическим эквивалентом в данной точке электрической сети и дополнительным удельным расходом активной мощности (квт/квар), вызванным снижением потребления реактивной мощности. Методике улучшения энергетических режимов асинхронных двигателей автор уделяет особенное внимание и подчеркивает большое значение вопроса об изъятии избыточной мощности электроустановок. Изложение хорошо иллюстрировано (свыше 70 рисунков, графиков, номограмм и таблиц). В качестве приложений в конце книги приведены подробные расчетные данные, в частности, и о нормальных величинах реактивной мощности и тока холостого хода у асинхронных двигателей почти всех находящихся в эксплоатации серий и габаритов.

ПЕРВАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ВЗЭИ 1949—1950 УЧЕБНОГО ГОДА (тезисы докладов). 62 стр., бесплатно. Всесоюзный заочный энергетический институт.

* **ПОЛЯКОВ Б. А.** КОНДЕНСАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ. 176 стр., ц. 10 руб. Госэнергоиздат.

САРЫЧЕВ Б. М. МОНТАЖНЫЕ КРИВЫЕ СТРЕЛ ПРОВЕСА ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ. Под общей редакцией **М. А. Гецова.** 160 стр., 13 руб. Госэнергоиздат.

СМИРНОВ Л. П., СОЛОВЬЕВ П. Ф. МОНТАЖ И ЭКСПЛОАТАЦИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ. 327 стр., ц. 9 руб. 55 коп. Госэнергоиздат.

СПРАВОЧНАЯ КНИЖКА ЭНЕРГЕТИКА НА 1950 ГОД. 208 стр., цена не указана. Госэнергоиздат.

ТАРИФНО-КВАЛИФИКАЦИОННЫЙ СПРАВОЧНИК РАБОЧИХ, ЗАНЯТЫХ НА РЕМОНТЕ ТЕПЛОСИЛОВОГО, ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И СЕТЕЙ. 100 стр., ц. 9 руб. Госэнергоиздат.

ФАБРИКАНТ В. Л. ФИЛЬТРЫ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ. 276 стр., ц. 17 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

* ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Под общей редакцией **К. М. Поливанова.** 556 стр., ц. 52 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.

* **ЦЕЙТЛИН Л. А.** ИНДУКТИВНОСТИ ПРОВОДОВ И КОНТУРОВ. 227 стр., ц. 14 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.

ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ И ИНДИКАТОРЫ. т. 1. Перевод под ред. А. Я. **Брейтбарта.** 429 стр., ц. 18 руб. Изд-во «Советское радио».

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается помещение рецензии.

◇ ◇ ◇

Сдано в набор 5/VII 1950 г. Подписано к печати 28/VIII 1050 г.
Объем 12 п. л. Уч.-изд. л. 16,6 Формат бумаги 60×92 1/8
Т-07502 Тираж 11 700 экз. Тип. зн. в печ. л. 55 000 Зак. 203.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ЦЕНА 8 руб.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru