

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

4
1946
АПРЕЛЬ

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

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| <i>В. А. Голубцова</i> — Вопросы подготовки инженерных кадров для энергетики | 3 |
| <i>П. С. Жданов</i> — Перспективы передачи электроэнергии переменным током на большие расстояния | 7 |
| <i>Б. С. Успенский и Ю. А. Якуб</i> — Основные принципы проектирования электромеханической части многоагрегатных водосливных гидроэлектростанций большой мощности | 14 |
| <i>М. Ю. Шухатович</i> — Задачи развития электрического привода врублевых машин и конвейеров | 20 |
| <i>В. П. Никитин, В. К. Туркин, Н. П. Куницкий</i> — Устойчивость работы и переходные процессы электроприводов с двигателями постоянного тока | 23 |
| <i>В. И. Петров и И. И. Петров</i> — О методах определения мощности электродвигателей при переменной нагрузке | 30 |
| <i>И. И. Кодкин</i> — Анализ работы компаундированного синхронного генератора | 36 |
| <i>К. А. Ачдрианов, О. И. Грибанова, Д. А. Гамбарова и А. Л. Карпова</i> — Новые теплостойкие диэлектрики — силиконы | 39 |
| <i>Н. А. Калякин</i> — Эффект высокой интенсивности в вольтовой дуге постоянного тока между угольными электродами | 45 |
| <i>В. С. Комельков</i> — Термические воздействия токов молний | 52 |
| <i>А. А. Вульф и О. В. Шербачев</i> — Режим короткого замыкания в линиях электропередачи, настроенных на полволны | 56 |
| <i>Л. Б. Гейлер</i> — О выборе асинхронного двигателя по среднему квадратичному моменту и току | 59 |
| <i>А. А. Воскресенский и Е. Ф. Воскресенская</i> — Уравнения кривых намагничивания трансформаторной стали | 62 |
| <i>Б. К. Буль</i> — Расчет вращающего момента индукционного реле направления мощности | 64 |
| Хроника | 67 |
| Стандарты | 77 |
| Библиография | 83 |
| Рефераты | 85 |
| <i>Е. Я. Казовский</i> — По страницам технических журналов США | 94 |



БИБЛИОТЕКА
Н
ВОЛОГОДСКАЯ

160600, г. Вологда, ГСП,
ул. М. И. Волковой, д. 1
Вологодская областная
библиотека им. И. Б. Бирюкова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик **Б. Е. Веденеев** (отв. редактор), член-корр. АН СССР
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, академик **Н. Д. Папаленси**, доктор техн. наук, проф.
Г. Н. Петров, канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, инж. **А. И. Товстопалов**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

Ответственный секретарь инж. Я. А. Клишовицкий

90:

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2/10, тел. К 4-24-80
Адрес для корреспонденции: Москва. Главный почтамт почтовый ящик № 646

Вопросы подготовки инженерных кадров для энергетики

Инж. В. А. ГОЛУБЦОВА

Директор Московского энергетического института им. Молотова

В своей исторической речи на собрании избирателей Сталинского избирательного округа г. Москвы 9 февраля 1946 г. товарищ Сталин, определяя основные задачи нового пятилетнего плана, уделил большое внимание вопросу развития науки в СССР. «Я не сомневаюсь, сказал И. В. Сталин, что если окажем должную помощь нашим ученым, они сумеют не только догнать, но и превзойти в ближайшее время достижения науки за пределами нашей страны».

Огромные задачи поставлены товарищем Сталиным в той же речи перед нашей промышленностью.

Совершенно ясно, что в разрешении новых поставленных задач, выдвинутых перед наукой и промышленностью СССР, важную роль будет иметь подготовка инженерных и научных кадров. Известно, что этому вопросу партия и правительство и лично товарищ Сталин посвящали большое значение, оказывая свою поддержку и помочь развитию высшей школы.

В настоящее время в области подготовки инженерных кадров назрело много вопросов, которые требуют серьезного обсуждения и неотложного разрешения.

Здесь необходимо иметь в виду три группы вопросов.

Первая группа охватывает вопросы **планирования кадров**: определение действительной потребности народного хозяйства в той или иной категории специалистов; определение и классификация работ и обязанностей, относящихся к званию инженера и к званию техника; установление необходимой пропорции в выпуске инженеров и техников одинаковых производственных профилей и, наконец, определение объема необходимых знаний и навыков, которыми должен обладать советский инженер и техник.

Вторая группа вопросов относится к нашей *средней школе*.

Поставлены на обсуждение общие вопросы подготовки инженерных кадров применительно к задачам энергетики СССР. Отмечается необходимость дальнейшего повышения уровня среднего образования, важность планирования потребности в инженерах и четкого определения их места на производстве. Подчеркивается большое значение лабораторно-производственной базы для развития учебной и научно-исследовательской работы в высшей школе; вносится ряд предложений по организации учебного процесса. В статье отражены основные положения одноименного доклада автора на научной сессии МЭИ в январе 1946 г.

Третья группа вопросов относится к постановке *высшего и среднего технического образования*, к приведению его в соответствие с основными задачами развития науки и техники в четвертой пятилетке, к взаимосвязи и взаимопомощи высшей школы и промышленности.

Вопросами планирования подготовки инженерных кадров и определения действительной потребности в них народного хозяйства у нас в Союзе, к сожалению, не занимаются в достаточной мере.

Речь идет о действительно глубоком, серьезном и научном подходе к этому вопросу, а не о средневзвешенных статистических данных, которыми сейчас приходится оперировать.

Если просмотреть пятилетку по кадрам любого министерства, то можно констатировать только наличие больших цифр и полное отсутствие однообразия принципов в подходе к этому вопросу даже у родственных по технологии и сложности производства отраслей промышленности.

Есть, например, министерства, считающие необходимым иметь одного инженера и двух техников на 10 чел. рабочих. В других министерствах считают по-другому, и в то же время ни одно из них не дает глубокого обоснования своей потребности в инженерных кадрах.

В промышленных министерствах и на производстве не всегда могут правильно определить, где должен быть поставлен инженер, а где техник (по должности и содержанию работы).

По-другому обстоит дело, например, в системе организаций здравоохранения, где права, обязанности и ответственность врача настолько определены, что не бывает, как правило, таких случаев, когда врач работает вместо фельдшера или медицинской сестры. Поэтому организациям, планирующим медицинские кадры, гораздо легче определять истинную потребность в своих кадрах.

Инженерам, и молодым инженерам в особенности, приходится позавидовать такой определенности установок.

Министерства и предприятия промышленности не всегда учитывают экономику, когда составляют и планируют свои потребности в инженерных и технических кадрах. Они нередко забывают, что инженер — это большой вложенный государством капитал в широком смысле этого слова.

Если пересчитать только на деньги, то пять лет обучения во втузе — это минимум 40 тысяч рублей государственных денег, каждые 100 молодых инженеров — это 4 миллиона рублей.

Совершенно ясно, что если бы с каждого предприятия при получении им молодых специалистов инженеров и техников государство взимало по себестоимости, то хозяйственники, безусловно, подумали бы о том, как бы грамотно прокалькулировать эту статью своего расхода с максимальным эффектом для производства.

Какое положение мы имеем сейчас?

Количество выпускаемых инженеров и техников в лучшем случае дает соотношение 1 : 2, но встречается соотношение и 1 : 0,8; инженеров выпускается нередко больше, чем техников. Заработок молодого инженера не намного больше зарплаты техника. Бывает так, что инженерами заполняются все без разбора свободные штатные должности на предприятиях. В результате *авторитет звания инженера* подрывается и затраченные государством усилия и средства не получают полноценного использования.

Наряду с этим неразумное и недостаточно ответственное отношение к планированию подготовки специалистов ведет и к другим ненормальным явлениям.

Здесь в первую очередь необходимо отметить недостаточное регулирование роста количества вузов. При организации высших учебных заведений часто совершенно не учитывают наличие и квалификацию преподавательских кадров, необходимость большой производственной и лабораторной базы и прочей специфики высшей школы. Можно привести примеры вузов, где заведующий кафедрой — ассистент.

С другой стороны, старые высшие школы не используются эффективно и работают с недогрузкой.

Отсюда ясно, что необходимо: 1) внимательно пересмотреть всю сеть высших технических учебных заведений и 2) также внимательно и строго пересмотреть действительную потребность в инженерных кадрах на производстве.

Одновременно необходимо поставить перед работниками высшей школы вопрос, кого и как они должны готовить, а также выяснить, какие втузы более рентабельны и целесообразны — крупные или небольшие и где действительно можно и должно создавать научные и методические школы.

Больным и острым вопросом является для вузов работа *средней школы*. Мы, работники высших технических учебных заведений, имеем претензии к системе среднего образования.

Хотя за последние годы благодаря заботам партии и правительства о средней школе было многое сделано для ее улучшения, однако качество подготовки учащихся в средней школе все еще заставляет нас до некоторой степени снижать уровень преподавания, так как общая культура школьника продолжает пока оставаться на явно недостаточном уровне.

В частности необходимо отметить слабое знакомство учащихся с классиками иностранной литературы, с основными вехами истории науки и техники и с деятельностью великих людей, которые эту науку и технику двигали.

В школах не ведется серьезная воспитательная и разъяснительная работа, которая помогала бы юноше и девушке выбрать жизненную дорогу и профессию, не разъясняется по-настоящему ответственность молодого человека перед государством за качество его будущей работы в высшей школе. Не ведется также пропаганда как среди школьников, так и среди родителей за среднее техническое образование. Часто отличники и медалисты средней школы не остаются передовиками в высшей школе. Нередки случаи, когда аттестаты оканчивающих школу не отвечают действительности с точки зрения пройденных в школе предметов. Таким образом совершенно очевидна необходимость дальнейшего решительного подъема уровня среднего образования.

В годы войны высшая школа находилась в тяжелом положении при проведении нового приема. Была очень сильная диспропорция между числом оканчивающих 10 классов и плановой цифрой приема в институты. Цифра приема превышала цифру оканчивающих. Результатом такого соотношения был недостаточный конкурс во втузах. По ряду институтов был недобор.

Эти годы дали чрезвычайно большую цифру отсева: например, по Московскому энергетическому институту им. Молотова за два года отсев выразился в 1 500 чел; отсев чрезвычайно осложнил работу института.

Последняя группа вопросов — это *вопросы работы самого втуза* и его задачи.

Эти задачи применительно к энергетическим вузам можно сформулировать следующим образом.

Мы должны выпускать такого инженера-энергетика, который мог бы самостоятельно, грамотно и инициативно разрешать действительно инженерные вопросы на производстве и был бы способен вести исследовательскую работу в научных организациях. Инженер, окончивший вуз, должен иметь организационные, производственные, монтажные и эксплуатационные навыки, а также приобрести навыки и воспринять элементы методики научно-исследовательской работы по своей специальности.

Мы должны выпускать такого инженера, общий культурный уровень которого соответствовал бы тем большим научным и практическим задачам, которые стоят перед советской энергетикой и электротехникой в четвертой пятилетке, первой пятилетке послевоенного периода.

Не менее важная задача, которую мы должны

поставить перед собой, — это работа по усовершенствованию учебного процесса и методики преподавания и по созданию условий для непрерывного научно-педагогического роста профессорского и преподавательского состава.

В Московском энергетическом институте им. Молотова для решения этой задачи создается лабораторно-производственная база в виде теплоэлектроцентрали, гидроэнергетических и теплотехнических лабораторий, диспетчерского пульта, модели электросетей, установки постоянного тока высокого напряжения и т. п. Организация в МЭИ демонстрационных кабинетов и экспериментальных мастерских также создает дополнительные предпосылки для того, чтобы педагогический процесс проходил на непосредственно лабораторно-производственной базе, на хорошо запоминающемся эксперименте.

В МЭИ создается база, на которой студент при максимальной самостоятельности может изучать физику явлений. Студент, работая в лабораториях и мастерских, может получить первые навыки научно-исследовательской работы, элементы необходимого инженерного чутья и технической культуры.

Эта же лабораторно-производственная база ставит перед профессорско-преподавательским составом большие методические задачи. Придется многим и многому переучиваться. Придется пересмотреть свою привычную, крепко освоенную, но нередко уже устаревшую методику преподавания и искать новых методических путей.

Нельзя забывать, что рост педагогических кадров вузов теснейшим образом связан с ведением научно-исследовательской работы и во многом зависит от контакта с промышленностью.

Развитие же лабораторно-производственной базы любого института и, в частности, такого как МЭИ, целиком зависит от отношения промышленности к высшим учебным заведениям. Втузы должны незамедлительно получать все новые образцы продукции (машины, аппараты, приборы и т. п.), выпускаемые советской промышленностью, как того требовал в свое время от руководителей предприятий Серго Орджоникидзе.

Если руководители наших предприятий будут такими же подчас скучными, как в настоящее время, если они не поймут, что технически отсталые лаборатории воспитывают технически отсталых инженеров и, в конечном счете, производство само проигрывает на своей грошевой и недальновидной скрупульности, то лабораторно-производственная база вузов будет отставать от современного уровня техники.

Вместе с тем следует помнить, что хорошо организованная современная лабораторно-экспериментальная база необходима высшему техническому учебному заведению не только для ведения педагогической работы, но и для постановки комплексной научно-исследовательской работы.

Проведенная в январе с. г. научная сессия МЭИ показала, какие достижения сделаны силами высшей школы в области научного исследования и какой широкий круг важнейших научно-

технических проблем энергетики ждет своей дальнейшей разработки.

Сессия заслушала и обсудила доклады профессоров и научных работников МЭИ: о проблемах физики в энергетике, о путях развития энергетики СССР после войны, перспективах развития передачи электроэнергии на большие расстояния постоянным и переменным током, генераторостроении и трансформаторостроении, современном состоянии вопроса перенапряжений и защиты от перенапряжений, о высоковольтных кабельных линиях, новейших типах высоковольтных выключателей, задачах развития автоматизированного электропривода, об автоматике и телемеханике в промышленности, электрификации транспорта, развитии электротермии, о перспективах повышения коэффициента полезного действия тепловых машин, котлостроении и паротурбостроении, газовых турбинах и т. д.

Не подлежит сомнению, что высококвалифицированные научные силы наших вузов в коопeraçãoции с научно-исследовательскими институтами промышленности и Академии наук СССР могут очень многое сделать для разработки проблем, выдвигаемых перед наукой новым пятилетним планом.

Обращаясь далее к основным вопросам в области улучшения учебного процесса, необходимо отметить следующее.

Нужно уменьшить нагрузку студента в институте, дать ему больше самостоятельности в распределении своего времени. В 5 700 часах академической работы должно заключаться не только то, что студенту излагают в институте. В этот же бюджет времени должна войти, как значительная часть, самостоятельная работа студента.

В учебные планы каждой высшей школы при подсчете часов на ту или иную дисциплину включаются три раздела — лекции, лаборатории и упражнения. Самостоятельная работа студента не планируется совершенно. Необходимо часть работы студента, например выполнение обязательных домашних заданий, подлежащих в дальнейшем контролю преподавателя, внести в эти часы и предоставить студенту от одного до двух дней в неделю, свободных от обязательного посещения института, в зависимости от курса, что должно повлечь за собой повышение требований к студенту при проверке его знаний на экзаменах.

За время пребывания в институте студент должен получить как на производственной практике, так и в стенах института навыки производственной и лабораторной работы. Поэтому в институте должны быть производственные и монтажные цехи и лаборатории, отражающие современный уровень науки и техники, а не уровень XIX или начала XX веков, и располагающие, как отмечено выше, новейшими образцами продукции нашей промышленности, а также образцами заграничной техники, внедряемой в СССР.

Учебный процесс в лабораториях и мастерских института должен проходить по свободной записи и в условиях односменной работы института.

Эти организации должны функционировать не меньше 12 часов в день. Студент может пробыть в лаборатории, мастерской не только 3—4 часа в неделю, как сейчас по расписанию, а столько, сколько требует его молодая, нарастающая по мере увеличения приобретаемых знаний, любознательность.

Лекции занимают сейчас в учебном процессе в среднем около 50% времени. Есть ли в этом необходимость, и какими должны быть лекции?

Несомненно, что лекции должны занимать в учебном процессе меньшее, чем это имеет место теперь, количество часов. Лектор не должен излагать весь возможный материал по своему предмету, чтобы студенту ничего не оставалось почерпнуть из учебника. Необходимо, чтобы студент получал помочь при чтении учебника, а не терял к нему вкуса.

Лекции должны отражать основные принципиальные вопросы теории, методологию решения задач и самые последние достижения в данной области науки и техники.

В этом случае лекция, прочитанная культурным языком, сопровождаемая хорошим демонстрационным материалом, дающая такой материал, пропуск которого трудно компенсировать книгами и журналами, будет всегда интересна и безусловно не будет пропускаться.

При этих условиях следует решительно возвращать против необязательного посещения лекций, ибо такой вид общения студента с ведущей профессорской необходим и должен оставаться.

Далее — об обязательности посещения уржненей. В своем подавляющем большинстве методика проведения упражнений такова, что упражнения являются пассивным видом занятий, на которых студент опять только слушает, при этом слушает, предварительно не готовясь.

Необходимо четко установить, где и в каком количестве упражнения действительно нужны. Сократив упражнения, нужно ввести часы консультаций, ввести в упражнения фактор времени с постепенным ужесточением его по мере освоения предмета.

Важным элементом в системе подготовки студента являются учебники. Учебники для высшей школы, это то же самое, что инструмент в производстве. Между тем в настоящее время часто имеется лишь 1 учебник на 10 студентов. Понятно, что при таком положении с учебниками доброкачественной работы от студента трудно ждать.

Какие требования нужно предъявить к учебнику?

Учебник не должен быть слишком объемистым и содержащим 60—70 печатных листов. Учебник не должен содержать такой материал, который через 2—3 года делал бы его устаревшим и не пригодным для преподавания предмета. Он должен включать теорию, методологию и основные принципиальные вопросы данного предмета, а также

исторические сведения по курсу. Все остальное студент должен находить в научной или технической периодике или в обычной научной или инженерной литературе.

Курсам новым или недостаточно отработанным необходимо проходить этап конспектов или монографий.

Первые два с половиной курса обучения студента в системе вузов являются теоретическими. Никаких прикладных и специальных знаний он не получает. За этот период студент должен создать себе основательный фундамент знаний по математике, физике, химии. В условиях энергетического института студент за это же время должен закрепить свои знания по теоретическим основам электротехники и теплотехники. Представляется также совершенно необходимым для электротехника получить знания по основам органической химии и, в частности, электрохимии. Эти дисциплины в существующих планах отражения не нашли.

Дальше начинается переход к специальным курсам. Здесь очень важно, чтобы преподавание этих курсов не упрощали, а проводили на таком уровне, чтобы основная база, полученная студентом, использовалась, чтобы студент тренировался и чтобы был по существу оправдан достаточно продолжительный период теоретического обучения.

Необходимо обратить внимание на то, что в настоящее время наблюдаются факты параллелизма и повторения материала в смежных курсах. К сожалению, приходится отметить не только то, что этот порок учебного процесса распространен, но и то обстоятельство, что борьбы с ним не ведется.

Необходим объективный, логический пересмотр программ всех курсов всего учебного плана. Эта работа очень трудоемкая, не лишенная внутренних противоречий. Однако ее во что бы то ни стало нужно проделать под углом зрения сырьевой самокритики и четкого анализа существующего положения.

В заключение необходимо подчеркнуть, что крупные, ведущие втузы могут и должны расширить круг своей деятельности. Эти втузы должны, во-первых, включить в регламент работы ежегодные курсы по повышению квалификации инженеров с производства, во-вторых, систематически знакомить со своей деятельностью работников других вузов и, в-третьих, так построить учебный процесс, чтобы профессора и преподаватели имели творческие отпуска, научные и производственные командировки.

Совершенно очевидно, что сплоченная работа и тесное общение высшей школы с промышленностью во всем многообразии возможных организационных форм помогут нам в самое кратчайшее время превзойти достижения зарубежных стран во всех отраслях науки и техники.



Перспективы передачи электроэнергии переменным током на большие расстояния

Доктор техн. наук, проф. П. С. ЖДАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Предел дальности передачи электрической энергии устанавливается соображениями экономического характера. Стоимость передачи с увеличением расстояния быстро возрастает и при определенных условиях достигает таких значений, при которых передача становится нерентабельной. Стоимость сооружения и себестоимость передачи энергии для нескольких крупных электропередач переменного тока в ценах 1939 г. можно иллюстрировать цифрами, приведенными на рис. 1.

При средней стоимости энергии в приемной системе 5–5,5 коп/квтч последняя из передач на рис. 1 может быть оправдана лишь при условии, что стоимость энергии передающей станции не превосходит 2 коп/квтч.

Цифры рис. 1 предполагают пиковый характер передающей электростанции при соответственно небольшом числе часов использования максимума нагрузки.

Значительно более благоприятны результаты, полученные на основании подсчетов Vögeli [Л. 1], дающие зависимость себестоимости передачи мощности 400 000 kW при напряжении около 300 kV от длины линии (рис. 2). Цифры себестоимости передачи на рис. 2 отнесены к стоимости энергии на шинах передающей станции и предполагают базисный характер последней.

Экономическая дальность передачи переменным током энергии гидроэлектростанций, повидимому, превышает все же 1 000 km.

Рассматриваются технико-экономические соображения о предельной дальности передачи электроэнергии переменным током и намечаются перспективы разграничения областей применения переменного и постоянного тока в линиях электропередачи. Статья является изложением доклада автора на научной сессии МЭИ в январе 1946 г.

Стоимость передачи согласно рис. 2 почти пропорциональна длине. Если бы для длинных линий удалось сохранить такие же удельные нагрузки на цепь, как и для относительно коротких линий, то стоимость передачи с длиной возрастала бы в гораздо меньшей степени, так как стоимость подстанций остается неизменной. Однако осложнения, связанные с устойчивостью параллельной работы передающей станции и приемника, вынуждают уменьшать удельные нагрузки на цепь у длинных линий, что при высокой стоимости последних резко ухудшает экономические показатели передачи. Альтернативой является применение специальных средств компенсации параметров линии. Этим и объясняется большое значение устойчивости для длинных линий передач.

В связи с волновым характером процессов в длинных линиях зависимость амплитуды передаваемой мощности от длины линии имеет, вообще говоря, периодический характер. Впрочем в пределах до 1 500 km, представляющих практический интерес, эта зависимость является непрерывно убывающей.

Уравнения линии без потерь:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \lambda + \dot{I}_2 j W \sin \lambda,$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_2 / \frac{1}{W} \sin \lambda + \dot{I}_2 \cos \lambda,$$

при $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = W = 1$ дают значение константы B

| | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|
| Передача | | | |
| Капитальные затраты, руб./kW | 630 | 1120 | 1390 |
| Себестоимость передачи, коп./кВтч | 1,52 | 2,39 | 3,18 |

Рис. 1. Стоимость сооружения и себестоимость передачи электроэнергии отдельных крупных электропередач.

и радиуса круговой диаграммы $r = P_{\max}$:

$$B = j \sin \lambda; r = \frac{U_1 U_2}{B} = \cos \lambda.$$

На рис. 3 показаны модификации круговой диаграммы линии без трансформаторов и генераторов и зависимость амплитуды мощности от волновой длины λ .

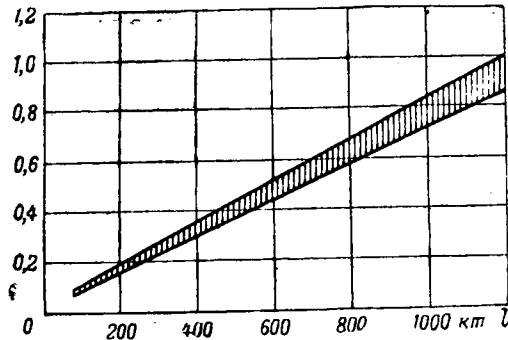


Рис. 2. Зависимость себестоимости передачи мощности 400 тыс. kW от расстояния.

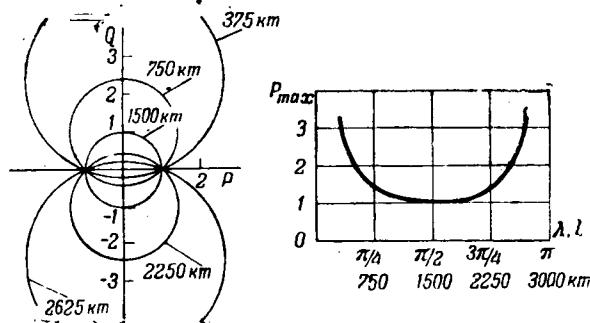


Рис. 3. Круговые диаграммы и амплитуда мощности при различных длинах.

С увеличением длины линии амплитуда мощности быстро уменьшается и достигает минимума (равного натуральной мощности) при $\lambda = \frac{\pi}{2}$ ($l = 1500$ km). Дальше амплитуда начинает вновь возрастать и становится бесконечно большой при $\lambda = \pi$ ($l = 3000$ km), так же как и при $\lambda = 0$ ($l = 0$).

Режим при $\lambda = \frac{\pi}{2}$ — так называемый режим четверти волны — очень интересен. Написанные выше уравнения линий без потерь при $\lambda = \frac{\pi}{2}$ принимают вид:

$$\dot{U}_1 = jW \dot{I}_2,$$

$$\dot{I}_1 = j \frac{1}{W} \dot{U}_2,$$

Напряжение в начале линии пропорционально току в конце и чрезвычайно резко изменяется с нагрузкой приемника, приближаясь к нулю при холостом ходе. Ток в начале пропорционален напряжению в конце и при приблизительно неизменном напряжении приемника остается по-

стоянным по величине при любой нагрузке вплоть до холостого хода.

Режим четверти волны обладает тем замечательным свойством, что при передаче любой активной мощности линия может работать с $\cos \varphi = 1$, как в конце, так и в начале. В связи с этим обстоятельством еще недавно отмечалась экономическая целесообразность передачи четвертью волны. Однако, к сожалению, этот «экономический» режим практически не может быть осуществлен. Как вытекает из рис. 3, именно этот режим создает наибольшие затруднения в отношении устойчивости. Нетрудно убедиться, что при $\cos \varphi = 1$ любая величина передаваемой мощности приводит к угловому сдвигу напряжений по концам линий в 90° и, следовательно, даже без учета влияния трансформаторов и генераторов система всегда находится на пределе устойчивости.

Таким образом при $\lambda = \frac{\pi}{2}$ линия с ее естественными характеристиками работать не может и в этих условиях совершенно необходимо компенсация параметров линии. Однако практически необходимость компенсации для увеличения пропускной способности линии возникает при значительно меньших длинах, начиная с 400—500 km.

Простейшим и давно известным средством компенсации длинных линий (которое можно назвать естественной компенсацией) является последовательное включение конденсаторов, компенсирующих индуктивность линии, и параллельное включение дросселей, компенсирующих емкость (рис. 4a).

Этим способом оказывается возможным полностью устранить влияние индуктивности и емкости линии, и для линии без потерь получить токи и напряжения по концам линии одинаковыми по величине и фазе. В этих условиях линии как будто бы не существуют и характеристика передаваемой мощности определяется только реактивными сопротивлениями трансформаторов и генераторов.

Установленный выше характер зависимости амплитуды мощности от длины линии свидетельствует о возможности осуществления компенсации и иного свойства — приведения эквивалентной длины линии к полуволне, на что обратили внимание сравнительно недавно.

Компенсация к полуволне может быть выполнена параллельным включением конденсаторов и последовательным включением дросселей, т. е. по существу средствами, прямо противоположными необходимым для естественной компенсации к нулевой длине (рис. 4b).

Напряжения и токи по концам настроенной на полуволну линии без потерь одинаковы по величине, но сдвинуты на 180° по фазе. Этот сдвиг остается одним и тем же при любых изменениях передаваемой мощности, благодаря чему характеристика мощности также оказывается сдвинутой на 180° . Амплитуда мощности, как и при нулевой длине линии, зависит лишь от реак-

тивных сопротивлений трансформаторов и генераторов.

Небезынтересно отметить, что элементы схемы замещения линии, компенсированной к полуволне, образуют известную схему Бушера, преобразующую неизменное напряжение в неизменный ток, и режимы напряжений и токов в самой линии получаются совершенно иными, чем при компенсации к нулевой длине. Следует подчеркнуть, однако, что с точки зрения пропускной способности линии совершенно безразлично, компенсировать ли линию к нулевой длине или к полуволне.

Возможность компенсации линии к полуволне была экспериментально проверена фирмой BBC в опытах на модели мощ-

ностью 170 кВА, проведенных в 1942 и 1943 гг. [Л. 2]. Эти эксперименты убедительно подтвердили эффективность такой компенсации. На рис. 5 показаны записи колебаний угла генератора при коротком замыкании на некомпенсированной линии. Для последнего случая кривая угла совершенно необычна. При начальном значении угла около 200° генератор после отключения короткого замыкания быстро тормозится и система остается устойчивой с значительным, повидимому, запасом. При той же величине передаваемой мощности и меньшей длительности короткого замыкания в случае некомпенсированной линии устойчивость оказывается нарушенной.

Фирма считает, что компенсация к полуволне исчерпывает проблему устойчивости. Можно, однако, думать, что при длине линий, меньшей четверти волны, которой, вероятно, и ограничивается практика, естественная компенсация к нулевой длине окажется более экономичной, чем компенсация к полуволне.

В опытах BBC была затронута и эта сторона вопроса, однако компенсация к нулевой длине осуществлялась не статическими конденсаторами и дросселями, а специальными устройствами: перечными бустерами Тейлора и синхронными компенсаторами Моргана. Как и следовало ожидать, оба эти устройства дали отрицательные результаты. Принципиальная несостоительность трансформаторов Тейлора была очевидной для всех, кроме автора конструкции. Неудовлетворительные условия работы серийных синхронных компенсаторов, предложенных Морганом, были нам хорошо известны по работам Л. В. Цукерника.

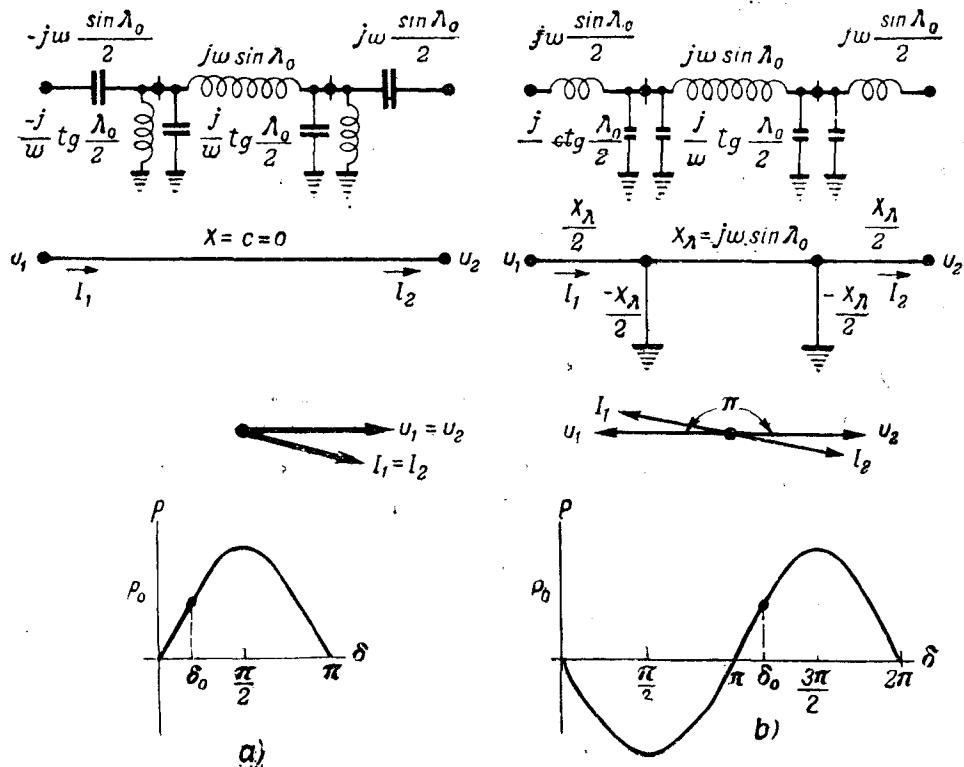


Рис. 4. Естественная компенсация линии и компенсация к полуволне.

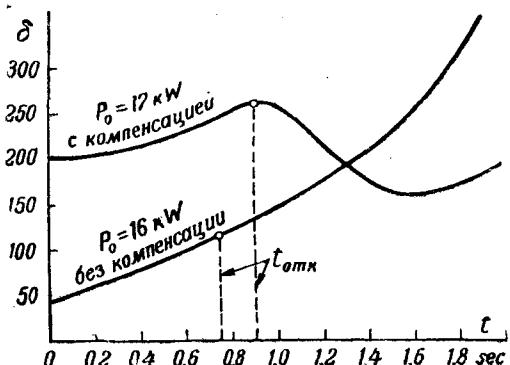


Рис. 5. Кривые качания роторов.

Эффективность естественной компенсации статическими конденсаторами и дросселями не вызывает никаких сомнений и, пожалуй, не нуждается в экспериментальном подтверждении. При умеренной длине линии последовательные статические конденсаторы и шунтирующие дроссели могут найти применение и независимо друг от друга, как самостоятельные средства для частичного улучшения работы линии. Статические конденсаторы при этом улучшают связь генераторов с приемником, частично компенсируя реактивное сопротивление связи, и уменьшают потерю напряжения; шунтирующие же дроссели улучшают устойчивость, позволяя поднять э. д. с. генераторов, и облегчают синхронизационные режимы работы линии.

Вопросами применения последовательных статических конденсаторов для длинных линий в последние годы занималась фирма GEC. Фирма считает применение конденсаторов целесообраз-

ным при длине линии около 600 km и больше. Весьма обстоятельные исследования Крери, Крона и других устранили опасения возникновения специфических неустойчивых режимов слабо нагруженных генераторов, связанных с влиянием активного сопротивления линий, компенсированных статическими конденсаторами. Авторы считают, что эти трудности надежно устраняются применением у генераторов демпферных обмоток.

Вопросы практического применения статических конденсаторов были рассмотрены в свое время при проектировании куйбышевских электропередач. Задача ограничения токов короткого замыкания требует равномерного распределения конденсаторов вдоль линии без подключения их непосредственно по концам линии. При этом один участок линии остается некомпенсированным. Токи короткого замыкания при замыканиях в промежуточных точках линии возрастают, приближаясь к значениям токов при коротком замыкании в начале или в конце линии передачи.

Увеличение токов короткого замыкания прежде всего отражается на самих конденсаторах, на зажимах которых возникают перенапряжения с амплитудой, пропорциональной току. В поврежденной цепи эти перенапряжения достигают величин, требующих применения защитных устройств: искровых промежутков и закорачивающих конденсаторы выключателей. Эти устройства не должны, однако, срабатывать на параллельных неповрежденных цепях. Точно так же они не должны работать в случае возрастаания напряжения от уравнительных токов при качаниях машин. Все это предъявляет повышенные требования к изоляции конденсаторов.

Для куйбышевских линий кратность перенапряжений на конденсаторах неповрежденных параллельных цепей составляла 1,5—1,6 и перенапряжений при качаниях 2,2—2,4.

Требование повышенной диэлектрической прочности равносильно увеличению номинальной мощности конденсаторов, что при высокой стоимости конденсаторов наносит серьезный ущерб экономичности этого средства компенсации.

Значительно более дешевым средством компенсации являются шунтирующие дроссели. Поскольку передаваемые мощности некомпенсированных длинных линий составляют лишь часть натуральной мощности, питающие линию генераторы работают с коэффициентом мощности, близким к единице, или даже в емкостном квадранте.

Компенсируя зарядный ток линии и увеличивая э. д. с. генераторов, шунтирующие дроссели заметно повышают устойчивость и позволяют поднять удельную нагрузку на цепь. Так, например, при применении для передачи Куйбышев—Москва шунтирующих дросселей, доводящих коэффициент мощности генераторов до 0,9, действительный предел мощности был получен равным 118,3%, тогда как без дросселей система в исходном режиме оказалась неустойчивой.

Повышение напряжения на отключенном конце при холостом ходе этой линии достигало

180%, что также свидетельствует о необходимости компенсации зарядного тока линии.

Дальнейшим шагом к увеличению эффективности дросселей является сильное насыщение сердечника дросселей, создающее резко выраженную нелинейную зависимость тока от напряжения. Насыщенные дроссели, помимо компенсации зарядного тока, вследствие их большого регулирующего эффекта (т. е. степени изменения реактивной мощности с напряжением) поддерживают напряжение в промежуточных точках электропередачи и тем самым в значительной мере реализуют идеи, положенные в основу схемы Баума. Доводя индукцию в сердечнике дросселя до 20—21 тыс. Г, можно получить регулирующий эффект в рабочей точке характеристики дросселя порядка 4—5 (у дросселя с линейной характеристикой — 2). Действительный предел мощности для куйбышевской электропередачи возрастает при этом еще на 12—15%.

Стоимость шунтирующих дросселей весьма невелика. Для указанной выше передачи она составляла около 1,8% от общей стоимости передачи. Применение линейных шунтирующих дросселей для этой и других передач Куйбышевского гидроузла было признано необходимым. Вопрос о насыщении дросселей оставался открытым до завершения опытных разработок, проводившихся Московским трансформаторным заводом вместе с ВЭИ. Были построены и испытаны образцы дросселей мощностью около 1 000 kVA с регулирующим эффектом, равным 4.

Небезынтересно указать здесь на полученные в результате эскизных проектировок удельные стоимости сооружения электропередачи Куйбышев—Москва при различных средствах компенсации: при линейных дросселях (напряжение 400 kV) — 1 390 руб/квт; при статических конденсаторах (снижение напряжения до 300 kV) — 1 270—1 300 руб/квт; при насыщенных дросселях (снижение напряжения до 320 kV) — 1 220 руб/квт.

Дальнейшее увеличение пропускной способности линии при выбранных средствах компенсации достигается в результате целесообразного изменения параметров основного оборудования: генераторов, трансформаторов и выключателей. Значение этих факторов иллюстрирует табл. 1 и рис. 6.

Несмотря на очень большую длину линии электропередачи (свыше 800 km), компенсированной только шунтирующими дросселями, и низкую исходную величину реактивного сопротивления генераторов ($x_d = 0,65$), дальнейшее уменьшение реактивного сопротивления в условиях табл. 1 заметно повышает предел передаваемой мощности и безусловно оправдывается, если даже уменьшение x_d достигалось бы обратно пропорциональным увеличением номинальной мощности машины, как это и было принято при экономической оценке в табл. 1.

Следует отметить, что в результате работ наших электротехников мы сейчас располагаем эффективными средствами регулирования возбуждения генераторов в виде электронного ре-

Таблица 1

Влияние параметров оборудования на стоимость сооружения и пропускную способность электропередачи

| Факторы | Действительный предел мощности, % P_m | Предельное время отключения трехфазного тока к. з., сек | Капитальные затраты на 1 kW в % от номин. к |
|---|---|---|---|
| Реактивное сопротивление генераторов x_d | | | |
| 1,1 $x_{d\text{ном}}$ | 116,7 | — | 101,6 |
| $x_{d\text{ном}}$ | 118,3 | — | 100,0 |
| 0,9 $x_{d\text{ном}}$ | 120,2 | — | 98,2 |
| Насыщение генераторов | | | |
| $\operatorname{tg} \beta = 1,2$ | 118,3 | — | — |
| $\operatorname{tg} \beta = 1,1$ | 114,2 | — | — |
| $\operatorname{tg} \beta = 1,0$ | 110,4 | — | — |
| Постоянная инерции M | | | |
| $M = 20 \text{ sec}$ | — | 0,144 | 97,7 |
| $M = 14 \text{ sec}$ | — | 0,123 | 100,0 |
| $M = 10 \text{ sec}$ | — | 0,104 | 103,1 |
| Реактивное сопротивление понижающих трансформаторов | | | |
| $x = 20\%$ | 115,2 | 0,110 | 102,9 |
| $x = 15\%$ | 118,3 | 0,123 | 100,0 |
| $x = 10\%$ | 122,1 | 0,126 | 97,5 |
| Напряжение линии | | | |
| 1,1 $U_{\text{ном}}$ | 123,4 | 0,135 | 109,4 |
| $U_{\text{ном}}$ | 118,3 | 0,123 | 100,0 |
| 0,9 $U_{\text{ном}}$ | 112,8 | 0,101 | 93,4 |
| Скорость отключения трехфазного к. з. | | | |
| Передаваемая мощность kW | | | |
| 480 000 | — | 0,170 | — |
| 540 000 | — | 0,124 | — |
| 600 000 | — | 0,076 | — |

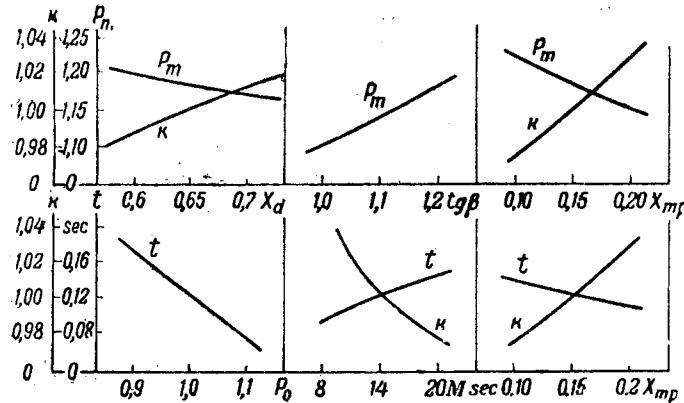
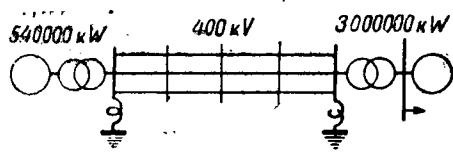


Рис. 6. Влияние параметров оборудования.

гулятора напряжения или схем компаундирования генераторов, в значительной мере компенсирующих влияние реакции якоря. В связи с этим обстоятельством были сделаны предполо-

жения об отсутствии необходимости в уменьшении синхронных реактивных сопротивлений генераторов, работающих на длинные линии.

Однако такая точка зрения вряд ли основательна. Не говоря уже о недопустимости получения таких условий, при которых надежность ответственных электропередач всецело ставится в зависимость от удовлетворительной работы регуляторов напряжения, следует указать и на то обстоятельство, что целесообразность уменьшения синхронных реактивных сопротивлений может оспариваться лишь тогда, когда это влечет за собой увеличение размеров и удорожание машин. Однако этой ценой достигается одновременно не только уменьшение синхронных реактивных сопротивлений, но, возможно, и уменьшение переходного реактивного сопротивления, и во всяком случае увеличения постоянной инерции. Такое изменение параметров генераторов оправдывается соображениями повышения не только статической, но и динамической устойчивости.

С повышенными значениями синхронных реактивных сопротивлений можно было бы примириться лишь при условии значительного насыщения магнитной цепи машины. Влияние этого фактора иллюстрирует рис. 6, где $\operatorname{tg} \beta$ характеризует наклон прямолинейной части характеристики холостого хода генератора.

Весьма целесообразно и вполне окупается экономически уменьшение реактивных сопротивлений и у трансформаторов, особенно понижающих.

Таким образом для улучшения работы длинных линий переменного тока имеются достаточно широкие возможности как в отношении компенсации параметров линии, так и в отношении надлежащего выбора параметров оборудования.

Для линий умеренной длины вполне удовлетворительным решением задачи является применение шунтирующих дросселей, уменьшение синхронного и переходного реактивного сопротивления генераторов и увеличение постоянной инерции.

Последний вопрос, на котором следует коротко остановиться, это надежность работы длинных линий. Вообще говоря, вероятность выхода линии с увеличением длины возрастает. Однако, в действительности, как это хорошо известно, надежность современных 220-kV линий длиной 200–300 км значительно выше, нежели вдвое и втрое более коротких линий 110 kV. Это связано не столько с увеличением уровня изоляции, но в еще большей степени с использованием эффективных средств грозозащиты и улучшением механических характеристик линий. Увеличение стоимости воздушных линий с ростом напряжения в значительной мере отражает стремление к повышенной надежности работы линий наивысших напряжений (что было учтено и в приведенных выше цифрах себестоимости передачи энергии переменным током).

Успехи, достигнутые в настоящее время в отношении быстродействующего повторного включения, позволяют рассчитывать на примене-

ние этого средства даже в тех неблагоприятных условиях, которые характерны для передачи мощности от удаленных гидроэлектростанций по схеме блока.

Правда, трехфазное повторное включение ввиду малых запасов устойчивости здесь вряд ли может быть использовано, но пофазное повторное включение может предотвратить потерю блока при однополюсном коротком замыкании. Тем самым вероятность выхода блока еще уменьшается примерно вдвое. Рис. 7 иллюстрирует возможность сохранения устойчивости при однополюсном коротком замыкании на некомпенсированной линии длиной 400 км. Несмотря на крайне тяжелые условия работы этой передачи, передаваемая мощность которой достигает 140% от натуральной мощности, устойчивость системы сохраняется при полном цикле отключения и повторного включения поврежденной фазы около 0,3 сек.

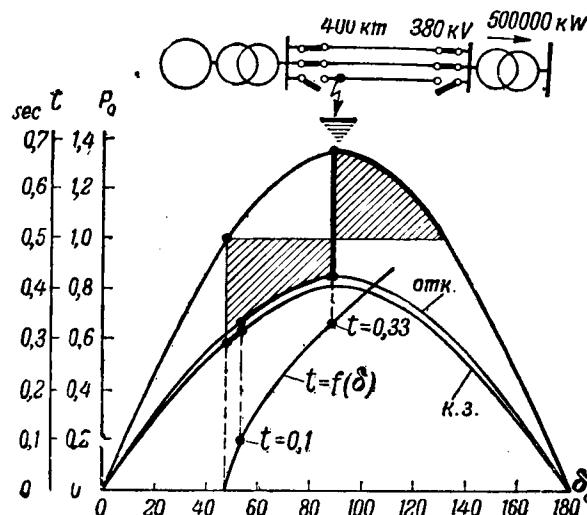


Рис. 7. Пофазное повторное включение при однополюсном коротком замыкании.

При связанный схеме электропередачи может быть осуществлено как пофазное, так и трехфазное повторное включение, но, разумеется, с иными целями и с меньшим эффектом.

Передача энергии переменным током, вообще говоря, может быть оправдана на расстояние до 1 000—1 500 км. При предельных расстояниях необходима компенсация линии с помощью статических конденсаторов и дросселей, которая осуществляется достаточно просто и надежно.

Другие средства компенсации с помощью машин и трансформаторов либо недостаточно эффективны, либо вообще неудовлетворительны. Однако электропередачи переменного тока на расстояния порядка 1 000 км практически вряд ли будут осуществлены, так как при таких расстояниях экономические преимущества постоянного тока более чем убедительны. Технически же осуществимость передачи постоянным током высокого напряжения в настоящее время несомненна.

В табл. 2 приведены цифры, характеризующие стоимость энергии у приемника в долях от стоимости энергии на шинах передающей станции для различных электропередач постоянного и переменного тока согласно Ehrenspurger [Л. 4].

Таблица 2

Сопоставление стоимости передачи постоянным и переменным током

| Тип линии электропередачи | Стоимость электроэнергии у приемника в коп. на 1 kWh | | |
|--|--|-------------------------|---------------------------|
| | 300 000 kW на 200 km | 600 000 kW на 600 km | 800 000 kW на 1 200 km |
| Воздушная линия переменного тока | 1,19—1,21 | 1,37—1,43 | 1,65—1,77 |
| Воздушная линия постоянного тока | | 1,26—1,31 | 1,37—1,44 |
| Кабельная линия постоянного тока | | 1,32—1,37 | 1,46—1,54 |

Воздушные линии постоянного и переменного тока в этой таблице предполагаются двухцепными с заземленной нейтралью на переменном токе и заземленной средней точкой на постоянном токе. Кабельная линия — двухпроводная с резервным проводом. По данным Ehrenspurger уже с 250—300 км постоянный ток получает преимущество над переменным. Однако в действительности эта граница лежит, повидимому, дальше, поскольку при отсутствии выключателей постоянного тока электропередачу постоянного тока следует сравнивать не со связанный схемой переменного тока, а с значительно более дешевой блоковой схемой, которая также может быть выполнена без выключателей на высшем напряжении или по крайней мере с минимальным числом выключателей. Это обстоятельство существенно потому, что стоимость аппаратуры с ростом напряжения увеличивается в гораздо большей степени, чем стоимость самой линии электропередачи. Так, например, при переходе с напряжения 220 кВ на 320 кВ стоимость 1 км линии возрастает со 140 тыс. руб. до 230 тыс. руб., а стоимость ячейки выключателя — с 600 тыс. руб. до 1 350 тыс. руб. Кроме того, блоковая схема допускает и большие удельные нагрузки на цепь с точки зрения устойчивости.

Во всяком случае для расстояний до 500—600 км разница в стоимости передачи постоянным и переменным током будет, повидимому, невелика и решающее значение при выборе той или иной системы тока в этой области будут иметь соображения технического совершенства и надежности. В этих условиях электропередачи переменного тока с их принципиальной простотой, несомненно, найдут свое место.

Хотя оптимальная величина рабочего напряжения линии электропередачи зависит не только от расстояния, но и от величины передаваемой мощности, можно предположить, что напряжение переменного тока порядка 300—330 кВ окажется достаточным для этих ограниченных целей.

В дальнейшем можно предвидеть возможность использования этого напряжения и для основных распределительных сетей крупных электрических систем, подобно тому как сейчас это имеет место в отношении напряжения 220 kV.

Перспективы развития электропередачи переменного тока следует ограничить, повидимому, расстоянием порядка 500—600 km и напряжением 330 kV. Отдельные магистральные линии следует выполнять по блоковой схеме, там где это позволяет приемная система.

При расстояниях порядка 500—600 km достаточно простейшая компенсация с помощью шунтирующих дросселей, подключаемых в начале линии на повышительной подстанции через разъединители. На этот путь уже вступила в сущности практика. Шунтирующие дроссели установлены на станции Кембс и на линии Канзас—Небраска (США). Длина последней приближается к 500 km.

Применение постоянного тока резко увеличивает предельную дальность передачи энергии — по крайней мере в 2—2,5 раза. При постоянном токе экономически может быть оправдана передача на расстояние 2 500—3 000 km.

Это более чем достаточно для решения всех практически мыслимых задач и этим определяется прежде всего значение проблемы постоянного тока высокого напряжения. Однако можно предвидеть применение постоянного тока и при расстояниях, меньших 500—600 km, наряду с линиями переменного тока. Действительно широкие перспективы развития постоянный ток получил бы, если бы удалось обосновать целесообразность его применения в области, которая охватывает современные линии переменного тока 220 kV, т. е. при расстояниях 200—250 km. К сожалению, самые оптимистические подсчеты приводят к заключению, что удешевление линий передачи на постоянном токе в этих условиях не оправдывает удорожания и усложнения подстанций.

Основанием для применения постоянного тока при умеренных длинах могла бы явиться возможность использования кабельных линий с их повышенной надежностью. Однако нельзя не отметить, что при несколько меньшей вероятности

аварии в высоковольтном кабеле сравнительно с воздушной линией последствия аварий в кабельных линиях гораздо тяжелее и ликвидация этих аварий, включая отыскание места повреждения и ремонт, встречает значительные трудности и приводит к длительным простоем. Преимущества воздушных линий с этой точки зрения с полной очевидностью были установлены в период второй мировой войны, как это отмечалось в английской и американской литературе. По тем же соображениям Ehrenspieger, отдающий в общем предпочтение кабельным линиям постоянного тока, пришел к необходимости прокладывать третий резервный кабель при двух рабочих, что приводит к значительному перерасходу меди. В подобных условиях кабельная линия постоянного тока длиной 200—300 km, оказывается гораздо более дорогой, чем воздушная линия не только постоянного, но и переменного тока.

Нам представляется, что перспективы применения постоянного тока при относительно коротких линиях должны быть связаны с дальнейшим удешевлением воздушных линий. Такая возможность открывается при сооружении линий постоянного тока напряжением 200—220 kV на деревянных опорах. Если на переменном токе деревянные опоры широко используются для напряжений, не превышающих 110 kV, то преимущества постоянного тока в отношении работы изоляции и короны позволяют рассчитывать на осуществление достаточно простых конструкций деревянных опор для двухпроводных линий постоянного тока до 220 kV включительно.

Выводы. Экономически оправдываемая дальность передачи энергии переменным током, вообще говоря, превышает 1 000 km. Однако экономические преимущества постоянного тока ограничивают перспективы развития электропередач переменного тока расстоянием порядка 500—600 km и напряжением 330 kV. В довольно широком диапазоне расстояний можно предвидеть параллельное развитие электропередач постоянного и переменного тока.

Литература

1. Vögele. SEV Bulletin, № 7, 1942.
2. BBC Mitteilungen, № 1, 1943.
3. Ehrenspieger. SEV Bulletin, № 6, 1942.



Основные принципы проектирования электромеханической части многоагрегатных водосливных гидроэлектростанций большой мощности¹

Инж. Б. С. УСПЕНСКИЙ и инж. Ю. А. ЯКУБ

В практике проектирования гидроэлектростанций большой мощности с относительно небольшими напорами на равнинных реках (типа предусмотренной в новом пятилетнем плане Молотовской гэс на р. Каме) наметилась тенденция раз-

мещать гидроагрегаты в теле водосливных плотин. Такое объединение гидроэлектростанции и плотины в одном сооружении приводит к уменьшению объема, стоимости и сроков строительных работ. Размеры агрегатов при этом выбираются с учетом сохранения минимальной величины заглубления основания плотины, определяемой геологическими условиями. Это требование вызывает необходимость разукрупнения агрегатов и установки на гидроэлектростанции большого числа машин.

При принципиально новом подходе к конструктивному оформлению мощной гидроэлектростанции со сравнительно небольшим напором вопрос о выборе конструкции блока «плотина—гидроэлектростанция» или типа агрегата (горизонтального или вертикального) представляется относительно менее существенным. Здесь возможен ряд решений, причем целесообразный выбор какого-либо решения еще трудно сделать ввиду полного отсутствия опыта строительства и эксплуатации и недостаточного опыта проектирования таких установок. В нашей периодической литературе [Л. 1] освещались некоторые из возможных решений, однако для определения оптимального из них требуется еще большая работа, результаты которой по мнению авторов трудно предвидеть.

Для основного электромеханического оборудования таких гидроэлектростанций любой конструкции характерным является большое число агрегатов относительно небольшой мощности, что приводит к необходимости изменения самих

В проектировании крупных гидроэлектростанций, сооружаемых на равнинных реках СССР, все большее значение приобретает новая прогрессивная тенденция: размещать гидроагрегаты в теле водосливных плотин. В статье рассматриваются основные вопросы электромеханического оборудования таких многоагрегатных водосливных гидроэлектростанций и предлагаются пути, позволяющие преодолеть эксплуатационные трудности, вызываемые наличием большого числа агрегатов. Печатается в порядке обсуждения.

принципов проектирования электромеханической части подобных гидроэлектростанций.

Разукрупнение агрегатов и связанное с этим увеличение их количества является с точки зрения эксплуатации безусловно отрицательным

фактором, с которым можно мириться только при получении больших преимуществ в отношении стоимости и сроков строительства станции.

Основной задачей проектирования электромеханической части многоагрегатных гидроэлектростанций является создание для них условий эксплуатации, максимально приближающихся к таковым у установок с небольшим числом агрегатов. Для этого необходимо преодолеть отрицательное влияние большого количества вспомогательного оборудования, удлиненных и усложненных коммуникаций (трубопроводов, шин и кабелей), увеличенной потребности в эксплуатационном и ремонтном персонале и т. д.

Отличительной особенностью проектирования электромеханической части водосливных гидроэлектростанций является необходимость детальной увязки строительной части станции с ее основным и вспомогательным оборудованием. Без комплексного подхода невозможно решение всей станции в целом.

В свете этих требований могут быть сформулированы следующие положения, касающиеся основных направлений в проектировании электромеханической части мощных многоагрегатных гидроэлектростанций.

1. Наличие большого числа основных агрегатов, вызванное требованиями уменьшения объемов строительных работ, не должно приводить к установке соответствующего количества комплексов вспомогательного гидромеханического и электротехнического оборудования. Наоборот, необходимо стремиться к всемерному укрупнению этого оборудования, предусматривая установку одного комплекта на несколько основных агрегатов.

¹ Тема была разработана бригадой МОНТОЭ в составе инж. М. В. Бергмана, инж. К. С. Пецуль и авторов статьи.

2. Основные агрегаты должны быть простыми по конструкции и объединять в одно целое в целях максимального упрощения эксплуатации все возможные вспомогательные устройства.

3. Надежная работа многоагрегатных гидроэлектростанций невозможна без их полной автоматизации, которая одновременно с тем приведет к сокращению потребности в эксплуатационном персонале [Л. 2].

4. При большом числе агрегатов особое значение приобретают максимальная стандартность, простота, четкость и наглядность всех связей как в части схем электрических соединений и схем водо-, масло- и воздухопроводов, так и в части компоновки и конструктивного выполнения вспомогательного оборудования.

С учетом настоящих положений ниже намечены решения для основных элементов электромеханической части многоагрегатных гидроэлектростанций.

Главная схема коммутации. Энергия мощных гидроэлектростанций, как правило, выдается по линиям высокого напряжения 110 или 220 кВ. В отличие от установок с небольшим числом мощных агрегатов, на которых применяется коммутация по блочной схеме «генератор — повышительный трансформатор», на станциях с большим числом агрегатов на один трансформатор необходимо коммутировать несколько агрегатов. Пределом должна служить максимальная возможная мощность трансформаторных единиц, определяемая, схемой коммутации и производственными возможностями трансформаторостроительных заводов.

Распределительные устройства (р. у.) генераторного напряжения, необходимые для осуществления такой схемы, должны рассматриваться только как элементы связи нескольких генераторов и одного трансформатора, в связи с чем к ним и должны предъявляться соответствующие

требования в отношении гибкости, надежности, месторасположения и т. п. В частности, эти р. у. целесообразно выполнять с одной системой сборных шин, применяя для них комплектные ячейки заводского изготовления с пожаро- и взрывобезопасной аппаратурой и располагая их в непосредственной близости от агрегатов с тем, чтобы по возможности сократить связи с несколькими генераторами за счет удлинения ее с трансформатором.

В целях снижения величин токов к. з. и повышения надежности электроснабжения от гидроэлектростанций шины р. у. генераторного напряжения необходимо секционировать, желательно по числу повышительных трансформаторов.

Для упрощения коммутации и эксплуатации гэс секционирование шин р. у. принимается жестким, без возможности переброски генераторов с одной секции на другую. Блок из нескольких генераторов и повышительного трансформатора рассматривается как одно целое.

Принципиальная главная схема коммутации многоагрегатной гэс, разработанная в соответствии с вышеприведенными положениями, дана на рис. 1.

Вспомогательное оборудование турбин и возбуждение генераторов. Вместо индивидуальных маслонапорных установок, применяемых на гидроэлектростанциях с небольшим числом агрегатов, при большом количестве последних возможно обслуживание нескольких турбин одной маслонапорной установкой². В этом случае ограничивающими факторами служат: рациональная

² Аналогичная система, принятая на насосных станциях канала Москва—Волга, где одна маслонапорная установка обслуживает четыре вертикальных пропеллерных насоса с диаметром рабочего колеса в 2,5 м, показала себя вполне надежной и удобной в течение девяти лет эксплуатации.

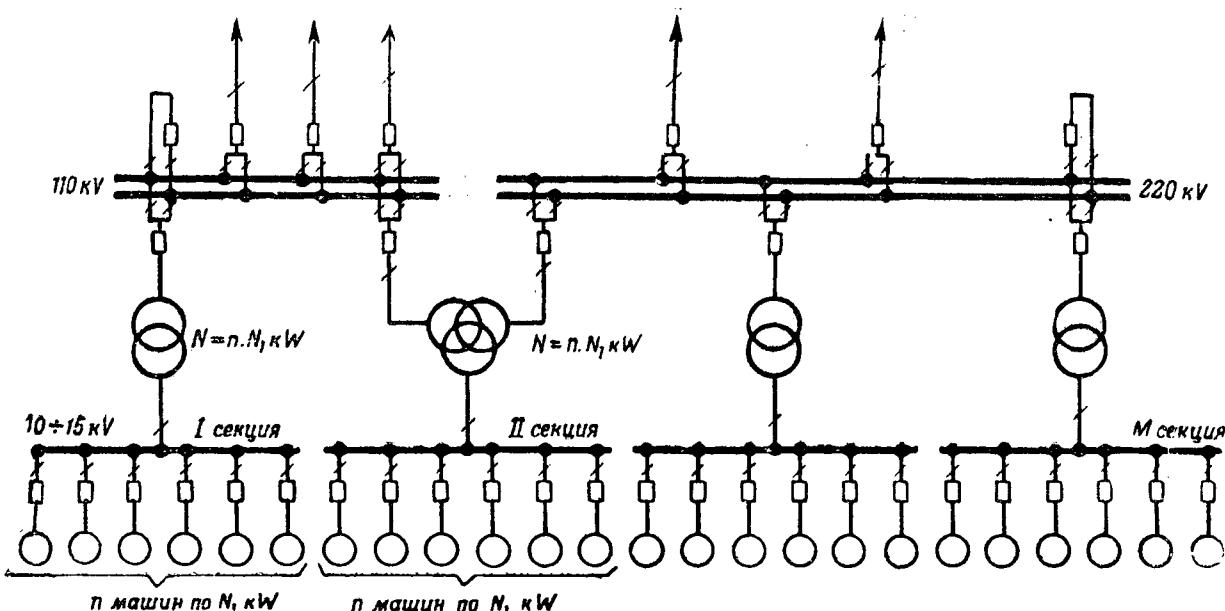


Рис. 1. Принципиальная главная схема коммутации многоагрегатной гэс.

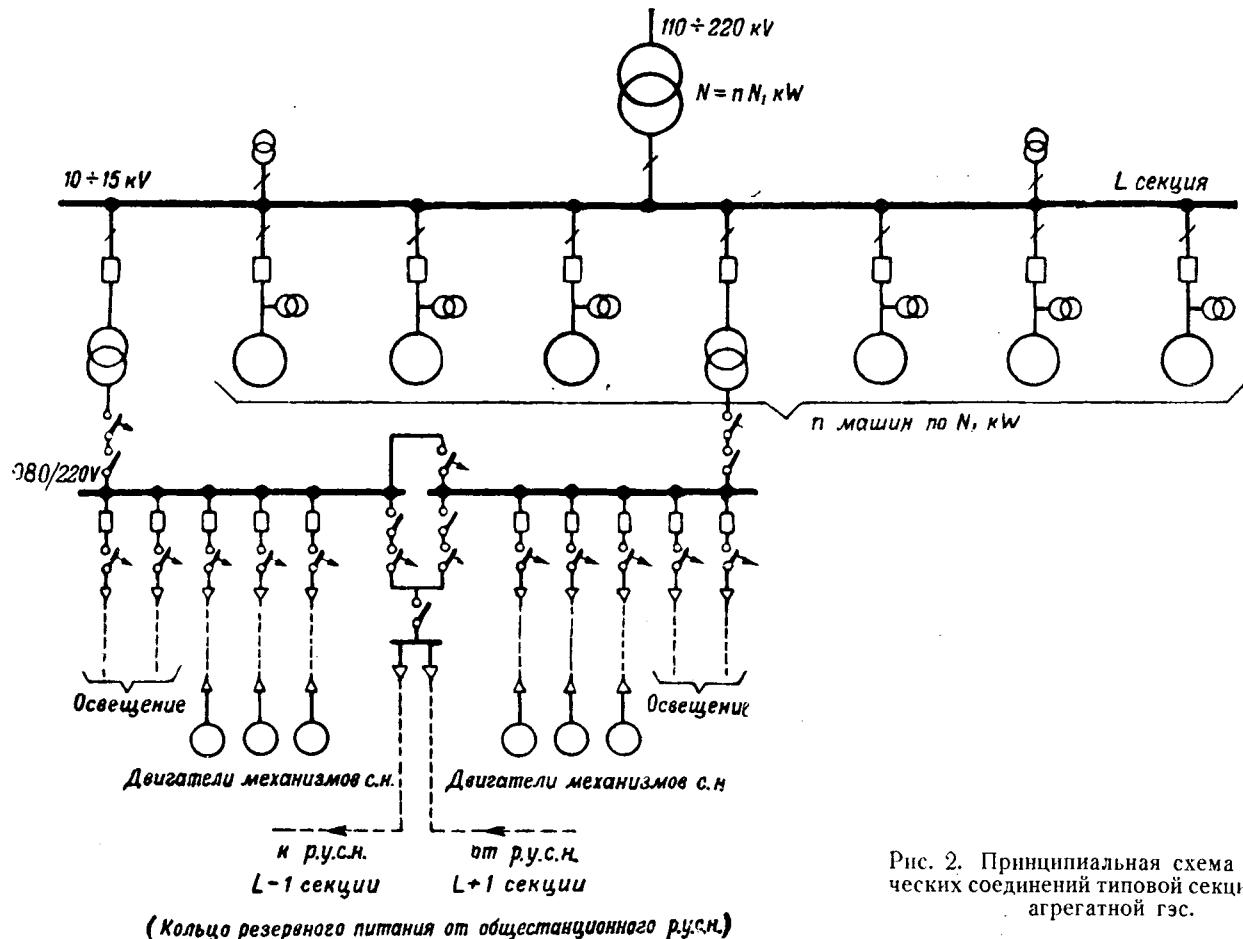


Рис. 2. Принципиальная схема электрических соединений типовой секции многоагрегатной гэс.

величина маслонапорной установки и число генераторов, объединяемых в блок с одним трансформатором, принятое в главной схеме коммутации. В большинстве случаев число турбин, обслуживаемых одной маслонапорной установкой, определяется ее величиной. Возможность установки одного регулятора на несколько турбин пока еще недостаточно исследована, но нет оснований считать, что и эта проблема не может быть решена положительно.

Все элементы агрегата, которые связаны с его работой и не могут быть укрупнены, должны быть или перенесены на вал агрегата или связаны с ним механически. При этих условиях единственным рациональным представляется применение схемы прямого возбуждения генератора с расположением возбудителя на валу самого агрегата. Вариант с отдельно стоящими возбудителями сильно усложняет схему электрических соединений системы собственных нужд и эксплуатацию агрегатов и при нем становится невозможным самозапуск агрегатов без подачи напряжения от постороннего источника. Поэтому, несмотря на желательность всемерного упрощения конструкции генераторов (что особенно необходимо для машин, располагаемых в теле плотины, и на чем настаивают конструкторы) возбудители должны быть помещены непосредственно на валу генераторов.

Электроснабжение потребителей системы собственных нужд. Электроснабжение потребителей

системы собственных нужд (с. н.) наиболее целесообразно осуществлять от шин промежуточных распределительных устройств генераторного напряжения через понизительные трансформаторы. При большом числе агрегатов станции такую схему электроснабжения можно считать вполне надежной.

При небольшой мощности основных агрегатов лишь незначительное число двигателей с. н. будет иметь мощность выше 50—70 kW, допускающую применение напряжения 3 kV, поэтому для питания всех потребителей системы с. н. целесообразно применять низкое напряжение. В целях уменьшения числа трансформаторов и упрощения схемы с. н. желательно осуществление совместного питания силовых и осветительных приемников, с применением напряжения 380/220 V с заземленной нулевой точкой, если этот вариант не дает существенного перерасхода меди по сравнению с вариантом раздельного питания силовых и осветительных приемников на напряжениях 500 и 380/220 V соответственно.

Для снижения величин токов к. з. и повышения надежности электроснабжения потребителей с. н. шины с. н. необходимо жестко секционировать по числу блоков главной схемы коммутации, без связи между шинами отдельных секций. Резервирование питания может осуществляться в этом случае от общестанционного р. у. с. н., питающегося через понизительные трансформаторы от шин р. у. повышенного напряже-

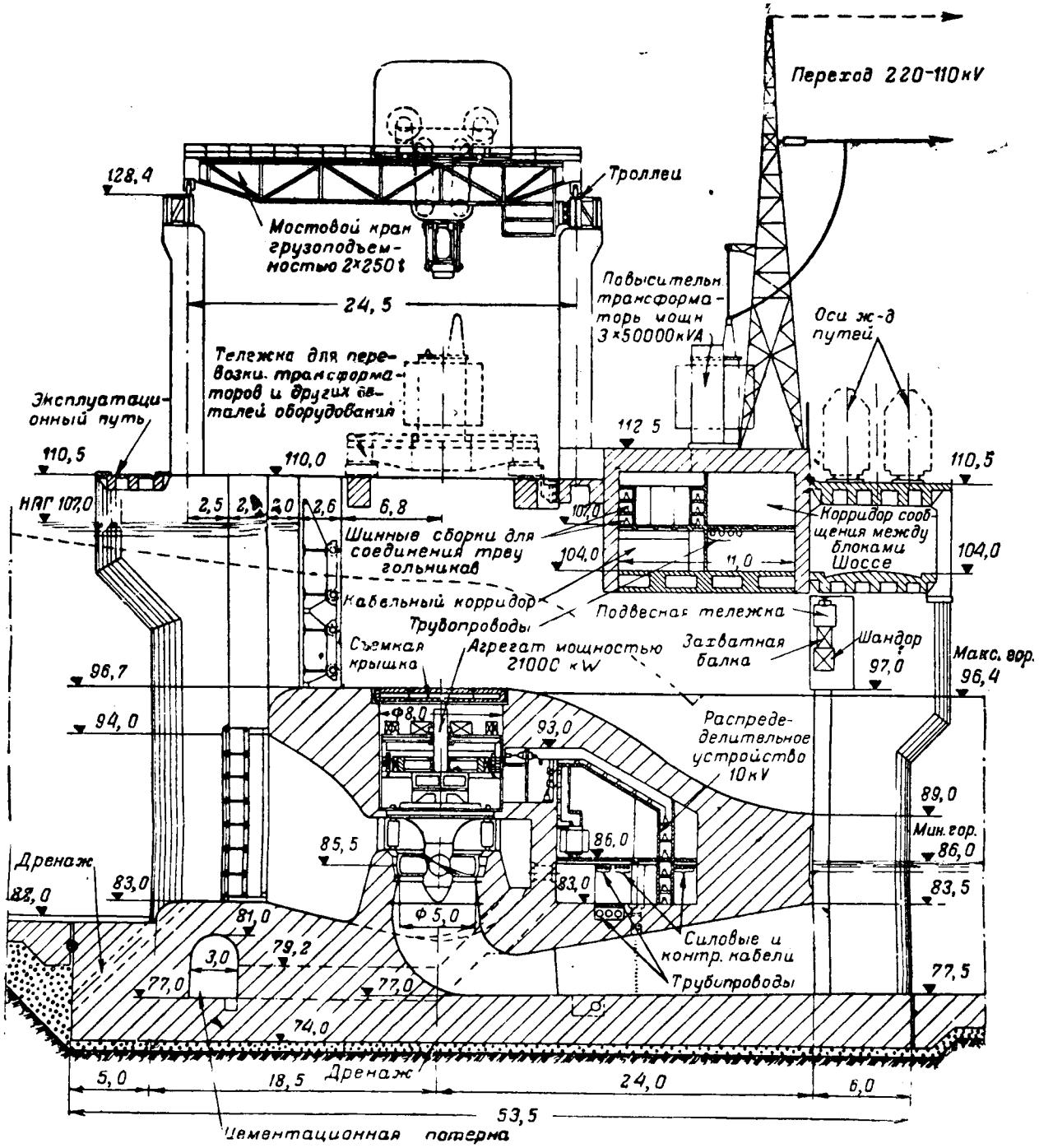


Рис. 3.

ния (110 или 220 кВ)), связанных с энергосистемой. Принципиальная схема с. н. станции, выполненная в соответствии с настоящими положениями, приведена на рис. 2.

В целях упрощения системы с. н. вне зависимости от числа агрегатов, установленных на гэс, весьма целесообразно, если это позволяют конкретные условия установки, применять системы технического водоснабжения и откачки воды из всасывающих труб, использующие естественный напор и не требующие насосов с электродвигателями. В этом случае вода поступает в сеть технического водоснабжения самотеком из верхнего бьефа гидроэлектростанции, а для откачки

воды применяются водоструйные насосы, использующие напор и воду верхнего бьефа.

Для повышения надежности работы станции и ее агрегатов необходимо, чтобы пуск и остановка агрегатов могли производиться без наличия напряжения переменного тока в сети собственных нужд. Это обеспечивается наличием достаточной емкости масловоздушных котлов маслонапорных установок, наличием технической воды для охлаждения масла или для смазки подшипников и подпятников, осуществлением возбудителей на валу агрегатов и т. п.

Система управления и автоматизация. Как уже отмечалось, надежная работа и сокращение

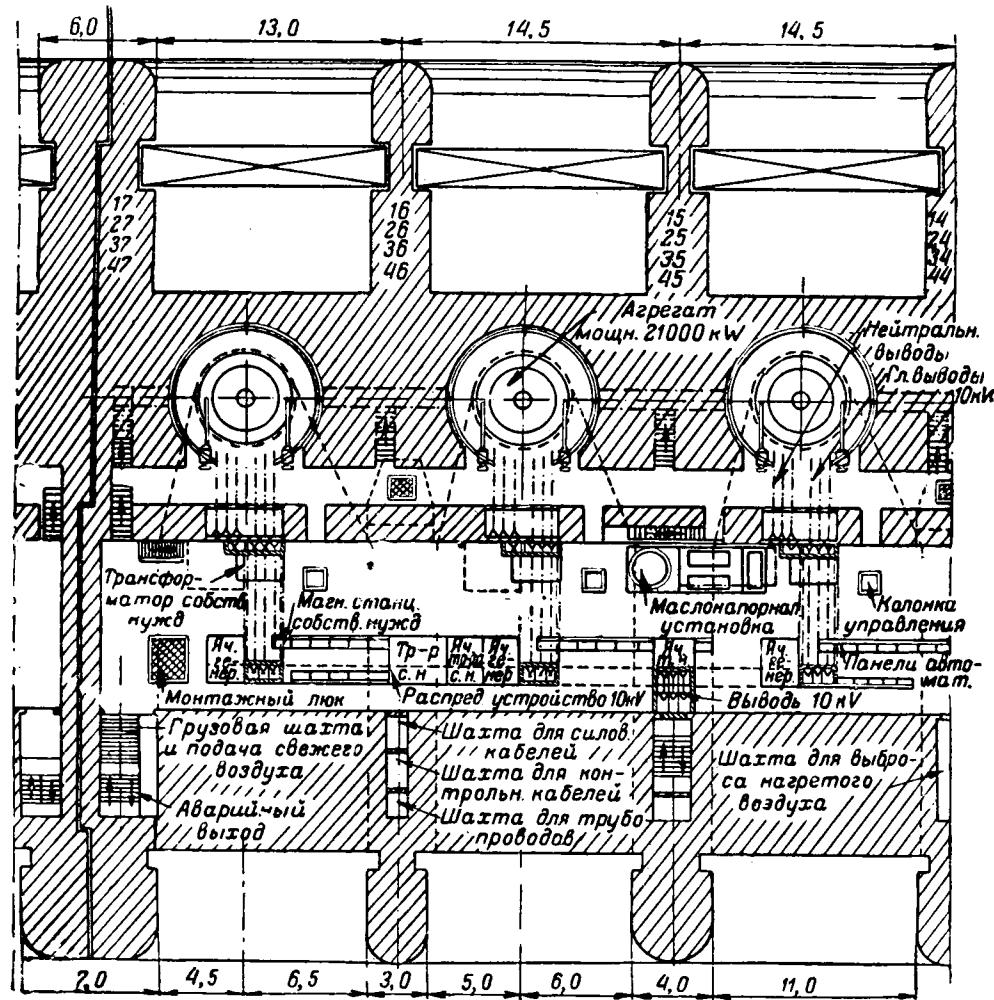


Рис. 4.

количества эксплоатационного персонала многоагрегатной гидроэлектростанции невозможны без полной ее автоматизации.

На основании опыта эксплоатации большого числа зарубежных гидроэнергоустановок, а также полностью автоматизированных станций и насосных станций канала Москва—Волга доказана возможность работы гидроэнергоустановок без присутствия персонала в машинном зале. Внедрение автоматизации сильно упрощает обслуживание станции и позволяет дежурному персоналу сосредоточить свое внимание на основных вопросах ведения эксплоатации, передоверив наблюдение за процессами пуска, остановки и нормальной работы главных агрегатов и вспомогательных устройств аппаратуре системы автоматики.

При этом значительно изменяются как функции, так и размеры главного щита управления гидроэлектростанции, который приобретает функции диспетчерского пункта, и имеет небольшие размеры, так как на щите выносится минимальное количество измерительных и сигнально-контрольных приборов.

С главного щита осуществляется централизованное управление агрегатами и коммутационной аппаратурой р. у. повышенных и генератор-

ного напряжений. В части агрегатов производится: пуск и остановка при режиме автоматизированной работы, перевод на местное управление, регулирование нагрузки и предела открытия направляющего аппарата, наблюдение за работой по измерительным приборам. Ввиду трудности управления большим числом агрегатов целесообразно объединить управление всеми агрегатами, работающими на один трансформатор, воздействуя на них помочью одного ключа.

Для опробования агрегатов в периоды наладки и после ремонта в машинном зале должны быть предусмотрены местные пульты управления, по возможности по одному на несколько агрегатов.

Принципы компоновки вспомогательного оборудования. Основным принципом компоновки вспомогательного оборудования многоагрегатной станции является строго одинаковое типовое расположение его для всех без исключения агрегатов, в противном случае создаются неприемлемые условия для эксплоатации.

В целях упрощения обслуживания вспомогательного оборудования, облегчения доступа к нему и быстроты ликвидации аварий и неполадок на станции, на эксплоатационных отметках должны быть предусмотрены сквозные проходы,

позволяющие дежурному и ремонтному персоналу быстро попадать на нужные участки станции.

Вспомогательное оборудование каждого агрегата для уменьшения и упрощения коммуникаций (трубопроводов, шин, кабелей) должно быть расположено максимально компактно. Желательно, чтобы местный пульт управления, регулятор и панели реле и автоматики каждого агрегата были расположены на общей отметке и были обозримы с одного места, что очень облегчает работу персонала при пуске, наладке и ремонте оборудования. При компоновке станции и ее оборудования необходимо стремиться к тому, чтобы разместить в нижней части блока «плотина—гидроэлектростанция» как можно большую часть вспомогательного оборудования, вынося наверх только высоковольтные повышительные трансформаторы.

Для повышения надежности работы и уменьшения последствий возможных аварий все соединения генераторного напряжения (генераторы — р. у., р. у. — повышительные трансформаторы) желательно выполнять шинными, с разделением фаз на всем их протяжении.

Ввиду расположения р. у. и трансформаторов с. и. непосредственно около генераторов гэс к ним необходимо предъявлять требования в отношении компактности и пожаро- и взрывобезопасности: трансформаторы должны иметь заполнение негорючей жидкостью, а выключатели р. у.

должны быть воздушными или в крайнем случае с малым содержанием масла.

Для обеспечения безопасности персонала и надежности работы агрегатов, расположенных в подводных помещениях на большой глубине (до 20—30 м) относительно отметок выхода наружу, необходимо осуществление ряда мероприятий, основными из которых являются: устройство приточно-вытяжной вентиляции с кондиционированием воздуха, устройство аварийной вентиляции, обеспечение достаточного количества лестничных клеток и лифтов, наличие противопожарных средств (углекислотных установок для генераторов, пенотушителей и т. п.).

На рис. 3 и 4 приведена для иллюстрации одна из возможных компоновок многоагрегатной гидроэлектростанции с вертикальными агрегатами, показанная для блока из шести агрегатов, на которые по конструктивным соображениям разделена вся станция. Эта компоновка, выполненная на основе положений настоящей статьи, показывает возможность рационального решения электромеханической части многоагрегатной водосливной гэс.

Литература

1. Б. К. Александров. Пути к ускорению и ущевлению строительства приплотинных гидроэлектростанций. Гидротехническое строительство, № 1—2, 1944.
2. А. М. Румянцев. Автоматика и телемеханика на канале Москва—Волга. Гидротехническое строительство, № 8—9, 1944.



Задачи развития электрического привода врубовых машин и конвейеров

Кандидат техн. наук М. Ю. ШУХАТОВИЧ

Институт горной механики Академии наук УССР

Перспективы развития электропривода в угольной промышленности требуют их тщательного анализа именно в настоящее время, когда восстановление и развитие угольной промышленности в масштабах, предусмотренных первым послевоенным пятилетним планом, могут происходить лишь на новейшей технической базе механизации и электрификации.

Как в Подмосковном и Кузнецком бассейнах, так и на шахтах Донбасса основными забойными механизмами являются врубовые машины и качающиеся конвейеры. При уровне механизации доставки, достигшей к 1940 г. в этом бассейне 92%, более 90% машин составляли именно качающиеся конвейеры. О значительном же применении тяжелых врубовых машин можно судить по тому факту, что из машин, имевшихся в парке всего Советского Союза, 78% работало в Донецком бассейне.

Состояние и направление развития электропривода врубовых машин. Основным типом врубовой машины в СССР является тяжелая цепная врубовая машина ГТК-3 (Горловского завода им. Кирова) с плавной подачей. Эта машина нормально работает с баром длиной 1,8 или 2 м, и снабжена двигателем ХЭМЗ типа МА-191/3 с дельтаасбестовой изоляцией класса В и длительной мощностью 14,5 kW.

Производство врубовых машин на этом заводе было начато в 1929 г. на базе машины CLE фирмы Сулливан. Первые машины были снабжены двигателями завода ХЭМЗ типа МД с полчасовой мощностью 22 kW при изоляции класса А. Все же последующие модели врубовых машин отечественного производства были созданы сначала в порядке модернизации, а затем уже в виде новых конструкций. В обоих случаях конструкторы придерживались «малогабаритного направления», создавая машины небольших по высоте габаритов (305 mm).

Конструирование врубовых электродвигателей было сосредоточено на заводе ХЭМЗ. Развитие советского врубового электродвигателя вначале шло по пути увеличения кратковремен-

Рассматриваются современное состояние и направление в развитии электрического привода врубовых машин и качающихся конвейеров. Намечаются задачи создания наряду с малогабаритными высокогабаритными специализированных врубовых электродвигателей повышенного скольжения и рациональной электроинженерной схемы автоматизации врубовых машин.

ной (часовой) мощности и обеспечения длительной мощности при сохранении габаритов двигателя. Благодаря улучшению циркуляции воздуха внутри двигателя, увеличению охлаждающей поверхности, применению дельтаасбестовой изоляции длительная мощность врубового двигателя (МА-191/3) была поднята с 8 до 14,5 kW, а часовая мощность была доведена до 26 kW. При этом коэффициент электромагнитного использования объема ротора по длительной мощности C вырос, как это следует из таблицы, вдвое.

Наряду с этими высокими коэффициентами советские врубовые электродвигатели характеризуются и высокими электромагнитными нагрузками, небольшими габаритами и небольшим маховым моментом. В этом отношении они принципиально отличаются от врубовых двигателей типа Самсон фирмы Мевор и Коульсон и Гудмен, которые являются представителями «высокогабаритного направления» в развитии подобных машин.

| Тип двигателя | Мощность, kW | | Коэффициент электромагнитного использования объема ротора C (по длительной мощности) | Высота двигателя, mm | к. п. д. при часовом режиме | Максимальная плотность тока при часовом режиме работы, A/mm ² | Скольжение ротора s , % | Маховой момент, kgm ² |
|---------------|----------------------------|---------------|--|----------------------|-----------------------------|--|---------------------------|----------------------------------|
| | длительная $P_{\text{дл}}$ | часовая P_t | | | | | | |
| МД-2 .. | 8,0 | 22,0 | 0,58 · 10 ⁻⁶ | 305 | 0,89 | 4,67 | 2,3 | 0,98 |
| МА-191/3 | 14,5 | 26,0 | 1,05 · 10 ⁻⁶ | 305 | 0,85 | 3,47 | 2,1 | 1,0 |
| CLE-2 .. | 8,0 | 22,0 | 0,58 · 10 ⁻⁶ | 305 | 0,885 | 5,00 | 1,95 | 0,98 |
| Самсон .. | 10,0 | 40,0 | 0,22 · 10 ⁻⁶ | 490 | 0,865 | 8,47 | 4,8 | 7,6 |

Тот факт, что советское врубостроение с самого начала пошло по малогабаритному направлению, объясняется наличием в Донецком бассейне значительного количества маломощных угольных пластов (до 0,74 м), дальнейшая экс-

плоатация которых будет иметь большое народнохозяйственное значение.

Однако достигнутая при дельтаасбестовой изоляции длительная мощность 14,5 kW не удовлетворяет потребностей угольной промышленности, так как возможная при этой мощности по допустимому перегреву относительная продолжительность рабочего периода (ПР) не превосходит 40%. Таким образом, почти 60% рабочего времени машины не используется вследствие перегрева двигателя. Поскольку увеличение производительности врубовой машины будет тормозиться недостаточной длительной мощностью двигателя, проблема увеличения последней по крайней мере до 26 kW является актуальной и в настоящее время. В решении этой задачи еще до войны наметились два направления.

Малогабаритное направление получило свое дальнейшее развитие в создании врубового электродвигателя ХЭМЗ со стеклянной изоляцией в габарите МА-191/3. При этом расчетный перегрев был доведен до 140° (класс СВ); длительная мощность врубового двигателя увеличилась до 21,5, а часовая до 40 kW. Это было достигнуто благодаря возможному при стеклянной изоляции более высокому коэффициенту заполнения паза и дополнительному увеличению сечения меди [Л. 2].

Испытание врубового двигателя со стеклянной изоляцией показало хорошие результаты, однако война помешала внедрению этих двигателей в промышленность.

Одновременно наметилось и некоторое отступление от малогабаритного направления. Были разработаны врубовые машины ГМА и ГВУ с врубовыми двигателями МА-191/5 и МА-191/8, высотой 350 mm, а также принято решение о допустимости увеличения высоты врубового двигателя до 400 mm и более. Однако промышленных образцов машин высокого габарита до сих пор не имеется.

В дальнейшем будет вполне целесообразно выпускать врубовые двигатели двух габаритов, причем оба двигателя должны быть сконструированы с максимально допустимым в настоящее время расчетным перегревом порядка 120—140°С (при изоляции класса СВ).

Первый габарит с высотой двигателя 305 mm и длительной мощностью 21—22 kW может быть применен для электрического привода нормальных врубовых машин, работающих с баром, длиной не более 2 m. Относительная продолжительность рабочего периода по допустимому перегреву при этом может быть доведена до ПР = 0,78, т. е. увеличена почти в два раза.

Второй габарит с высотой двигателя 350—400 mm, и с длительной мощностью 39—45 kW может быть применен для электрического привода угольных комбайнов (например, комбайна С-24), врубовых машин с изогнутым баром и других подобных машин.

Развитие автоматизации врубовых машин до войны. Пиковый и переменный характер нагрузочной диаграммы врубовой машины давно привлекает внимание конструкторов и специалистов

по электрическому приводу. Вследствие переменной крепости зарубки, заштыбовки режущей цепи и других причин пики мощности нередко достигают 4—5-кратных значений по отношению к номинальной величине. Выравнивание нагрузочной диаграммы может быть достигнуто лишь при автоматическом регулировании работы врубовой машины в зависимости от нагрузки двигателя.

Идея автоматизации подачи врубовой машины принадлежит советским инженерам. Однако разработанные ими до войны способы автоматизации работы этой машины не обеспечивают вполне удовлетворительного выравнивания нагрузочной диаграммы. Почти все предложенные схемы используют для регулирования работы врубовой машины дифференциал Хилда и предусматривают лишь автоматическое регулирование скорости подачи при неизменной скорости резания, вследствие чего оптимальное соотношение между скоростью резания и скоростью подачи нарушается.

Врубовые машины иностранных фирм не имеют автоматизированных приводов, однако фирмы Гудмен и Мевор и Коульсон применяют для привода врубовых машин компаундные двигатели постоянного тока, а при трехфазном токе — двигатели (типа Самсон) повышенного скольжения с большим маховым моментом.

Применение маховичных двигателей повышенного скольжения является конструктивно наиболее простым способом выравнивания нагрузочной диаграммы. Но такой способ ее выравнивания в случае применения короткозамкнутых двигателей возможен лишь при достаточно больших их габаритах, как это имеет место для врубовых машин Самсон (высота 490 mm) и Гудмен.

При малогабаритном направлении в конструктировании врубовых двигателей применение последних с повышенным скольжением при изоляции класса В практически невозможно. Этим и объясняется тот факт, что наши конструкторы вынуждены были пойти по пути создания сложных электрокинематических схем автоматизации. Между тем динамическое уравновешивание с применением двигателей повышенного скольжения является более простым конструктивным решением. Кроме того, при мягкой характеристике двигателя колебания нагрузки вызывают изменения числа его оборотов, а следовательно, и скоростей подачи и резания, почему уравновешивание получается более совершенным. Следует отметить, что в электрокинематических схемах с дифференциалом Хилда также желательно, чтобы главный двигатель имел мягкую характеристику. Что же касается увеличения махового момента, то это может быть сделано или за счет перераспределения железа между ротором и статором, что оказывается возможным и целесообразным, именно в двигателях повышенного скольжения, или благодаря насадке небольшого маховичка на вал двигателя.

По расчетам автора увеличение номинального скольжения врубового двигателя МА-191/3

до 6% позволяет увеличить маховой момент за счет перераспределения железа между ротором и статором на 22%. Возможная отдача кинетической энергии системой увеличится при этом в 4,6 раза. Таким образом, следует признать целесообразным конструирование врубового двигателя со стеклянной изоляцией с номинальным скольжением порядка 6% и маховым моментом 1,3 kgm^2 . При перегреве в 140° С этот двигатель будет иметь длительную мощность 15,5 kW и к. п. д. = 0,85 [Л. 2].

Вопрос о том, какой из описанных способов выравнивания нагрузочной диаграммы врубового двигателя будет принят в качестве стандартного решения, может быть решен лишь в результате обобщения опыта эксплоатации экспериментальных образцов врубовых машин, построенных с применением указанных принципов.

Состояние и направление развития электропривода качающихся конвейеров. В отличие от врубовых конвейерных двигателей до самого последнего времени не являлись вполне специализированными. От серийных взрывобезопасных машин конвейерные двигатели БАОК-51/4 и УТК-14,5/1 500 отличались лишь большим диаметром вала и большими пусковыми моментами.

С появлением конвейерного привода ПК-19 их двигатели становятся более специализированными, как, например, фланцевые двигатели типа МА-173-Ф-2/4 завода ХЭМЗ. В связи с модернизацией конвейерных приводов был поставлен вопрос и о модернизации конвейерных двигателей. Резкопульсирующий, знакопеременный характер нагрузочной диаграммы конвейерного привода, являющийся следствием наличия в приводе кривошипно-шатунного механизма и переменных маховых масс, приводит к необходимости применения какого-либо способа уравновешивания.

Из ряда способов механического уравновешивания некоторое распространение имело лишь упругое (пружинное) уравновешивание, эксплоатационная ненадежность которого, однако, ограничила его распространение.

Более надежным является динамическое уравновешивание качающегося конвейера. Некоторые английские и американские фирмы выпускают конвейерные приводы с дополнительными маховиками на валу двигателей. Исследования, проведенные автором статьи, показали, что при жестких характеристиках двигателей динамическое уравновешивание не является достаточно эффективным и требует довольно больших маховых моментов [Л. 1]. Поэтому было предложен

применить для привода качающегося конвейера асинхронные короткозамкнутые двигатели повышенного скольжения ($s_n = 6 - 10\%$), позволяющие снизить пиковые и среднеквадратичные моменты почти в два раза.

Надежность эксплоатации благодаря этому значительно повышается. В настоящее время конвейерные двигатели являются едва ли не самыми аварийными в угольной промышленности. Поэтому применение для конвейерных приводов динамического уравновешивания с помощью двигателей повышенного скольжения является весьма актуальной задачей.

Выводы и предложения. Таким образом развитие электрического привода врубовых машин и качающихся конвейеров должно быть направлено по пути создания специализированных двигателей повышенного скольжения, сконструированных с расчетом на применение стеклянной изоляции при высоком длительном перегреве порядка 120—140° С.

Применение подобных двигателей: а) значительно снижает аварийность благодаря уменьшению пиков нагрузки и пусковых токов; б) повышает эксплоатационную надежность забойных машин в связи с малой гигроскопичностью и высокой противостойкостью стеклянной изоляции воздействию кислот и масел; в) повышает длительную мощность врубовых двигателей без увеличения их габаритов, при сохранении запаса термической прочности в пределах норм.

Дальнейшее конструирование электродвигателей должно вестись в двух направлениях. По линии *малых габаритов* (высота 305 mm) для обычных врубовых машин и *высоких габаритов* (350—400 mm) для специальных врубовых машин и комбайнов.

Одновременно следует продолжать работы по созданию рациональных электрокинематических схем автоматизации врубовой машины, в частности с применением гидравлического привода.

Увеличение эксплоатационной надежности и длительной мощности врубовых электродвигателей создаст благоприятные условия для повышения производительности врубовых машин, являющихся первыми звенями в цепи комплексной механизации угледобычи, в 1,5—2 раза.

Литература

1. М. Ю. Шухатович. Двигатели с повышенным скольжением для электропривода качающегося конвейера. Сборник трудов Днепропетровского горного института, вып. III, 1941.
2. Стеклянная изоляция. Сборник статей, Госэнергопиздат. 1943.



Устойчивость работы и переходные процессы электроприводов с двигателями постоянного тока

Академик В. П. НИКИТИН, В. К. ТУРКИН и Н. П. КУНИЦКИЙ

Значительная часть современных механизмов, используемых в промышленности, военном деле и т. д., работает с изменяющейся нагрузкой и в повторно - кратковре-

менном режиме работы. Быстрое исполнение поставленного задания является одним из основных требований, предъявляемых к ним. Изменения режима работы сопровождаются переходными процессами. При анализе работы механизма с меняющейся нагрузкой эти процессы имеют несравненно большее значение, чем при исследовании действия механизма с практически постоянным режимом работы.

Основные вопросы, которые необходимо разрешить при анализе переходных процессов, сводятся к выяснению того, затухает ли рассматриваемый переходный процесс (является ли рассматриваемое состояние динамического равновесия устойчивым), и, в положительном случае к определению численного значения величин, характеризующих быстроту затухания переходного процесса — коэффициента затухания, постоянной времени и т. д. Условия устойчивости динамического равновесия и значения основных параметров при переходных процессах определяют в основном производительность и мощность большого числа используемых в настоящее время механизмов. Без достаточно подробного и строгого исследования этого круга вопросов затруднительно разрешить задачу автоматизации электропривода и произвести выбор схем и аппаратов управления им. В некоторых случаях (трехобмоточный двигатель в системе Леонарда, реверсивный двигатель блюминга и т. д.) выбор основных параметров электрических машин определяется, по существу, только характером переходных процессов электропривода.

Особое значение приобретают вопросы динамического равновесия электропривода в связи с развитием автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности (металлургической, горной, машиностроительной, химической и т. д.). В ряде случаев (реверсивный прокатный стан, быстроходные лифты и другие механизмы) анализ условий устойчивости и переходных процессов выявляет возможности

В работе приведены результаты теоретического исследования устойчивости работы электропривода с двигателями постоянного тока и соответствующих переходных процессов. Излагается схема применения методов Ляпунова в теории электропривода и рассмотрено использование ее при исследовании устойчивости работы электропривода с шунтовым двигателем постоянного тока.

значительного повышения производительности агрегатов.

В СССР и за границей опубликовано много работ, посвященных исследованию переходных

процессов и условий устойчивости работы электропривода, однако теоретическая разработка данной области все еще отстает от потребностей практики. В большинстве работ рассмотрены лишь весьма частные случаи, и они не дают общих методов расчета с учетом нелинейности систем. В настоящей статье излагается примененный для ряда различных видов электропривода общий метод исследования переходных процессов и определения критериев устойчивости работы. Метод основан на математических исследованиях Пуанкаре и Ляпунова. Однако, ввиду сложности представляющих практический интерес схем электропривода использование методов Пуанкаре и Ляпунова в теории электропривода приводит обычно к формулам, ценность которых снижается громоздкостью. Чтобы получить из этих формул данные, представляющие интерес для инженера, занимающегося расчетом электропривода, требуется провести значительную дополнительную работу.

Аналитические методы получения критериев устойчивости работы электропривода. Основное дифференциальное уравнение теории электропривода имеет вид:

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где t — время; ω — угловая скорость двигателя; M — момент, развиваемый двигателем; M_c — момент сопротивления производственной машины; J — момент инерции.

Лишь в наиболее простых из представляющих практический интерес случаев решение уравнения (1) может быть записано в виде конечной комбинации элементарных функций. В частности, это возможно, например, когда момент инерции J постоянен, а момент M , развиваемый двигателем, и момент сопротивления

производственной машины M_c — линейные функции ω :

$$M_c = \alpha + \beta \omega, \quad M = \alpha_1 + \beta_1 \omega.$$

В этом случае

$$\omega = \frac{\alpha_1 - \alpha}{\beta - \beta_1} + C e^{-\frac{\beta - \beta_1}{J} t}, \quad (2)$$

где C — постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий. Из (2) следует, что критерием устойчивости процесса будет:

$$\frac{\beta - \beta_1}{J} > 0. \quad (3)$$

Условие (3), очевидно, можно заменить условием

$$\beta - \beta_1 > 0. \quad (4)$$

Скорость затухания определяется значением коэффициента затухания

$$\frac{\beta - \beta_1}{J}. \quad (5)$$

Состояние динамического равновесия системы [при выполнении условия (4)] характеризуется значением переменного ω , равным

$$\omega^* = \frac{\alpha_1 - \alpha}{\beta - \beta_1},$$

так как именно к этому значению стремится ω при $t \rightarrow \infty$. Назовем величину ω^* установившимся значением переменного.

Как мы уже указали, решение уравнения (1), вообще говоря, не может быть выражено в конечном виде через элементарные функции, и получение критериев устойчивости (равно, как и выяснение других характерных свойств закона изменения скорости вращения) связано с использованием более или менее сложного математического аппарата. С подобного рода положением особенно часто приходится иметь дело при рассмотрении электропривода с нагрузкой, меняющейся непрерывно или же претерпевающей периодические скачкообразные изменения.

В процессе работы электропривода изменяются с течением времени не только скорость вращения, но и ряд других величин (например, токи, напряжения, магнитные потоки и т. д. относящиеся к различным составным элементам системы). Обозначим эти меняющиеся в функции от t величины (включая величину ω) через

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k. \quad (6)$$

Предположим, что величины (6) связаны между собой дифференциальными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\omega_1}{dt} &= f_1(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k), \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= f_2(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k), \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \\ \frac{d\omega_k}{dt} &= f_k(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Правые части уравнений (7) считаем аналитическими функциями переменных (6) в области $|\omega_i| < H (i = 1, 2, \dots, k)$, где H — некоторая положительная константа.

При исследовании на устойчивость системы, характеризуемой уравнениями (7), найдем прежде всего значения переменных (6), удовлетворяющие системе уравнений:

$$\left. \begin{aligned} f_1(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k) &= 0, \\ f_2(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k) &= 0, \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \\ f_k(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Как известно, установившиеся значения величин (6), т. е. значения (если такие значения вообще существуют), к которым асимптотически стремятся величины (6) при неограниченном возрастании t , должны удовлетворять системе уравнений (8).

Пусть

$$\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_k^* \quad (9)$$

— некоторая совокупность значений переменных (6), удовлетворяющих системе уравнений (8). Введем обозначения

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 - \omega_1^* &= \tilde{\omega}_1, \\ \omega_2 - \omega_2^* &= \tilde{\omega}_2, \\ \dots & \dots \dots \dots \\ \omega_k - \omega_k^* &= \tilde{\omega}_k. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Подставив значения переменных (6) из равенств (10) в дифференциальные уравнения (7), получим для переменных

$$\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k \quad (11)$$

систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tilde{\omega}_1}{dt} &= \varphi_1(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k), \\ \frac{d\tilde{\omega}_2}{dt} &= \varphi_2(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k), \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \\ \frac{d\tilde{\omega}_k}{dt} &= \varphi_k(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Предполагая, что значения (9) лежат внутри вышеупомянутой области аналитичности правых частей уравнений (7), мы можем считать, что правые части уравнений (12) являются аналитическими функциями переменных (11) в области

$$|\tilde{\omega}_i| < K (i = 1, 2, \dots, k),$$

где K — некоторая положительная константа.

Пусть разложение правых частей уравнений (12) в ряды по степеням переменных (11) имеет вид:

$$\varphi_1(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k) = \alpha_{11}\tilde{\omega}_1 + \alpha_{12}\tilde{\omega}_2 + \dots + \alpha_{1k}\tilde{\omega}_k + \dots + \Phi_1(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k),$$

$$\varphi_2(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k) = \alpha_{21}\tilde{\omega}_1 + \alpha_{22}\tilde{\omega}_2 + \dots + \alpha_{2k}\tilde{\omega}_k + \Phi_2(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k),$$

$$\varphi_k(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k) = \sigma_{k1}\tilde{\omega}_1 + \sigma_{k2}\tilde{\omega}_2 + \dots + \sigma_{kk}\tilde{\omega}_k + \Phi_k(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k),$$

где

$$\Phi_i(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_k) \ (i=1, 2, \dots, k).$$

совокупность членов степени выше первой соответствующего ряда¹.

Рассмотрим теперь алгебраическое уравнение

$$\begin{vmatrix} a_{11} - x & a_{13} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} - x & \dots & a_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & a_{k2} & \dots & a_{kk} - x \end{vmatrix} = 0. \quad (13)$$

Если действительные части всех корней уравнения (13) отрицательны, состояние

$$\left. \begin{array}{l} \omega_1 = \omega_1^*, \\ \omega_2 = \omega_2^*, \\ \dots \dots \dots \\ \omega_k = \omega_k^* \end{array} \right\} \quad (14)$$

рассматриваемой нами системы устойчиво; это означает, что в случае малых отклонений величин (6) от значений (9) система будет стремиться вернуться к состоянию, характеризуемому равенствами (14). Если хотя бы один из корней уравнения (13) имеет положительную действительную часть, то состояние динамического равновесия (14) неустойчиво. Когда же действительные части некоторых корней уравнения (13) равны нулю и действительные части остальных корней того же уравнения отрицательны, тогда возможна как устойчивость, так и неустойчивость состояния (14).

Изложенный метод был применен к исследованию на устойчивость работы некоторых типов электроприводов с шунтовыми, серийес-

ными и компаундными двигателями постоянного тока.

В качестве примера рассмотрим случай электропривода с шунтовым двигателем постоянного тока, работа которого дается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U &= Ri + c(\Phi - bi) \omega, \\ M &= M_c + J \frac{di}{dt}, \\ U &= r_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt}, \\ M &= k(\Phi - b_l) i, \\ \Phi &= i_e + a_1, \\ M_c &= \alpha + \beta \omega + \gamma \omega^2. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Здесь U — напряжение на зажимах двигателя; R — сопротивление цепи якоря; i — ток якоря; Φ — магнитный поток; ω — угловая скорость; M — момент двигателя; M_c — момент сопротивления производственной машины; J — момент инерции; r_e и L_e — сопротивление и индуктивность цепи обмотки возбуждения; i_a — ток той же обмотки; a , a_1 , b , c , k , α , β , γ — коэффициенты, значения которых зависят от конструктивных особенностей двигателя и производственной машины. Величины i , ω , i_a , M , M_c , Φ считаем переменными функциями независимого переменного t ; все остальные величины, входящие в систему (15), — постоянные.

Исключив из системы (15) переменные i, M, M_c, Φ , получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left\{ k \left[a i_s + a_1 - b \frac{U - c(a i_s + a_1) \omega}{R - b c \omega} \right] \times \right. \\ &\quad \left. \times \frac{U - c(a i_s + a_1) \omega}{R - b c \omega} - (a + \beta \omega + \gamma \omega^2) \right\}, \quad (16) \end{aligned}$$

Таким образом для определения установившихся значений ω^* и i_b^* переменных ω и i получаем систему уравнений:

$$k \left[ai_e + a_1 - b \frac{U - c (ai_e + a_1) \omega}{R - bc\omega} \right] \frac{U - c (ai_e + a_1) \omega}{R - bc\omega} - \\ - (\alpha + \beta\omega + \gamma\omega^2) = 0, \quad U - r_e i_e = 0.$$

Очевидно, $i_e^* = \frac{U}{r_e}$, а для ω^* получаем урав-

нение четвертой степени:

$$r_s^2(\alpha + \beta \omega^* + \gamma \omega^{*2})(R - bc\omega^*)^2 = k [R(Ua + a_r) - Ubr_r] [Ur_s - c(Ua + a_r)\omega^*]. \quad (17)$$

1 Членов нулевой степени рассматриваемые ряды, очевидно, не могут иметь, так как правые части уравнений (12) должны обращаться в нуль при $\tilde{\omega}_1 = \tilde{\omega}_2 = \tilde{\omega}_3 = \dots = \tilde{\omega}_s = 0$

Исследуем устойчивость состояния:

$$\begin{aligned}\omega &= \omega^*, \\ i_s &= i_s^*,\end{aligned}\quad (18)$$

где ω^* — какой-либо из действительных корней уравнения (17). Для этого в системе (16) произведем замену переменных:

$$\omega - \omega^* = \tilde{\omega}, \quad i_s - i_s^* = \tilde{i}_s.$$

Для переменных $\tilde{\omega}$, \tilde{i}_s получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{d\tilde{\omega}}{dt} &= h_1 \tilde{\omega} + h_2 \tilde{i}_s + F(\tilde{\omega}, \tilde{i}_s), \\ \frac{d\tilde{i}_s}{dt} &= -\frac{r_s}{L_s} \tilde{i}_s,\end{aligned}$$

где h_1 , h_2 — постоянные коэффициенты, а $F(\tilde{\omega}, \tilde{i}_s)$ — совокупность членов степени выше первой относительно $\tilde{\omega}$ и \tilde{i}_s . Не представляет труда проверить, что

$$\begin{aligned}h_1 &= -\frac{1}{J} \left\{ \beta + 2\gamma\omega^* + \right. \\ &+ ck \frac{2b[Ur_s - c(Ua + a_1 r_s)\omega^*] - (Ua + a_1 r_s)(R - bc\omega^*)}{r_s^2(R - bc\omega^*)^3} \times \\ &\left. \times [Ubr_s - R(Ua + a_1 r_s)] \right\}\end{aligned}$$

(значение коэффициента h_2 и вид функции $F(\tilde{\omega}, \tilde{i}_s)$ нас не интересуют).

Рассмотрим уравнение

$$\begin{vmatrix} h_1 - x & h_2 \\ 0 - \frac{r_s}{L_s} - x & \end{vmatrix} = 0.$$

Корни этого уравнения будут

$$x_1 = -\frac{r_s}{L_s}, \quad x_2 = h_1.$$

Таким образом условия устойчивости состояния динамического равновесия, характеризуемого равенствами (18), имеют следующий вид:

$$-\frac{r_s}{L_s} < 0, \quad h_1 < 0.$$

Первое из этих условий не представляет интереса, так как величины r_s и L_s — положи-

тельны; второе можно (приняв величину J также положительной) записать в виде:

$$\begin{aligned}\beta + 2\gamma\omega^* &+ \\ + ck \frac{2b[Ur_s - c(Ua + a_1 r_s)\omega^*] - (Ua + a_1 r_s)(R - bc\omega^*)}{r_s^2(R - bc\omega^*)^3} \times \\ &\times [Ubr_s - R(Ua + a_1 r_s)] > 0.\end{aligned}\quad (19)$$

Полученное условие устойчивости (19) имеет такой сложный вид, что возникает вопрос о возможности практического использования этого критерия. Использование его можно облегчить прежде всего некоторым упрощением записи.

Из системы (15) следует, что

$$\Phi = ai_s + a_1, \quad i = \frac{U - c\Phi\omega}{R - bc\omega}.$$

Поэтому для установившихся значений Φ^* и i^* переменных Φ и i будем иметь:

$$\begin{aligned}\Phi^* &= ai_s^* + a_1 = \frac{Ua + a_1 r_s}{r_s}, \\ i^* &= \frac{U - c\Phi^*\omega^*}{R - bc\omega^*} = \frac{Ur_s - c(Ua + a_1 r_s)\omega^*}{r_s(R - bc\omega^*)}.\end{aligned}$$

Следовательно, условие (19) может быть переписано в виде:

$$\begin{aligned}\beta + 2\gamma\omega^* &+ \\ + ck \frac{2b(U - c\Phi^*\omega^*) - \Phi^*(R - bc\omega^*)}{(R - bc\omega^*)^3} (Ub - \\ &- R\Phi^*) > 0\end{aligned}\quad (20)$$

или

$$\beta + 2\gamma\omega^* + ck \frac{2b\Phi^* - \Phi^*}{(R - bc\omega^*)^2} (Ub - R\Phi^*) > 0. \quad (21)$$

Однако эти формулы громоздки. Они могут быть упрощены в отдельных частных случаях, когда знаки тех или других коэффициентов можно считать заданными.

Предположим, например, что исследуемое установившееся значение ω^* переменного ω соответствует точке на восходящей части параболической характеристики

$$M_c = \alpha + \beta\omega + \gamma\omega^2$$

момента сопротивления производственной машины, т. е. что

$$\frac{dM_c}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega^*} = \beta + 2\gamma\omega^* > 0.$$

Кроме того, предположим, что величина

$$ck(Ub - R\Phi^*) = \frac{ck}{r_s} [Ubr_s - R(Ua + a_1 r_s)],$$

например, положительна. Тогда выполнение условия устойчивости (20) будет обеспечено, если ω^* больше большего из чисел

$$\frac{2Ub - R\Phi^*}{bc\Phi^*}, \quad \frac{R}{bc} \quad (22)$$

или если ω^* меньше меньшего из этих чисел. Обозначив через ω_1 меньшее из чисел (22), а через ω_2 большее, получим, что устойчивость обеспечена, если ω^* соответствует точке на восходящей части характеристики левее ω_1 или правее ω_2 (на рис. 1 эти участки характеристики начертаны жирно). Аналогичные критерии могут быть получены и для других комбинаций знаков величин

$$\beta + 2\gamma\omega^*, ck(Ub - R\Phi^*).$$

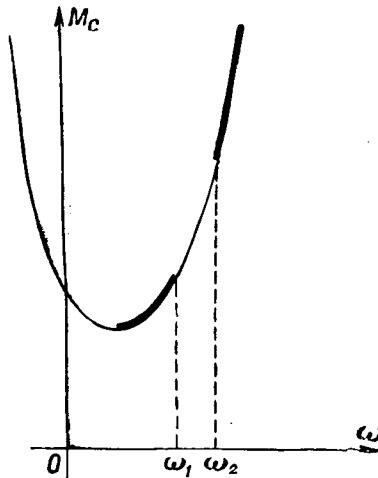


Рис. 1.

Параболическая характеристика ($M_c = a + b\omega + \gamma\omega^2$).

Еще более значительные упрощения могут быть проведены, если пренебречь в системе (15) некоторыми членами, т. е. отказаться от учета влияния некоторых факторов, принятых во внимание при составлении уравнений этой системы. Предположим, например, $\gamma = 0$, т. е. будем считать характеристику момента сопротивления производственной машины прямолинейной, а не параболической. В этом случае условие устойчивости (21) примет вид:

$$\beta + ck \frac{2bi^* - \Phi^*}{(R - bc\omega^*)^2} (Ub - R\Phi^*) > 0;$$

кривая

$$\beta + ck \frac{2bi^* - \Phi^*}{(R - bc\omega^*)^2} (Ub - R\Phi^*) = 0;$$

в плоскости $i^* 0 \omega^*$ является границей между областями устойчивости и неустойчивости. Предположим², что величины

$$\beta, ck(Ub - R\Phi^*)$$

положительны. Перейдем от координат i^*, ω^* к координатам λ, μ по формулам

$$\lambda = bi^* - \Phi^*,$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\beta}{2ck(Ub - R\Phi^*)} - (R - bc\omega^*)}.$$

² Другие комбинации знаков этих величин могут быть рассмотрены совершенно аналогично.

В координатах λ, μ уравнение кривой, пограничной между областями устойчивости и неустойчивости, будет:

$$\lambda = A - \mu^2, \quad (23)$$

где

$$A = -\frac{\Phi^*}{2}.$$

Формула

$$i^* = \frac{U - c\Phi^* \omega^*}{R - bc\omega^*}$$

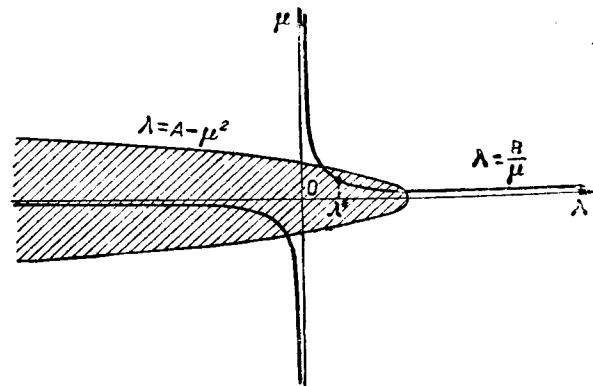


Рис. 2.
Случай прямолинейной характеристики ($M_c = a + b\omega$).

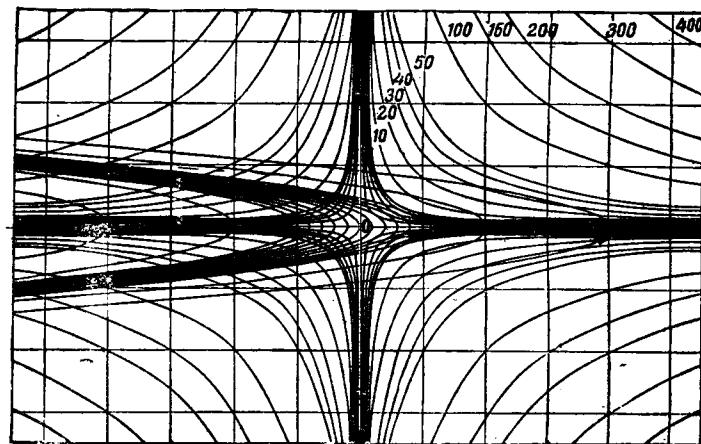


Рис. 3.
Диаграмма для шунтового двигателя с прямолинейной характеристикой ($M_c = a + b\omega$).

после перехода к новым координатам принимает вид:

$$\lambda = \frac{B}{\mu}, \quad (24)$$

где

$$B = \sqrt{\frac{\beta(Ub - R\Phi^*)}{2ck}}.$$

Таким образом получается весьма простой метод исследования на устойчивость. Проведем в плоскости $\lambda 0 \mu$ параболу (23) и гиперболу (24). Если точка гиперболы, имеющая абсциссу

$$\lambda^* = bi^* - \Phi^*,$$

будет находиться со стороны выпуклости параболы, то равновесие будет устойчивым; если со стороны вогнутости (как на рис. 2), то оно неустойчиво.

На рис. 3 приведены параболы и гиперболы, соответствующие различным значениям коэффициентов A и B . Подобного рода диаграмма может быть практически использована при исследовании рассматриваемой системы на устойчивость.

Отметим, что в разобранном случае прямолинейности характеристики момента сопротивления производственной машины ($\gamma = 0$) имеется некоторое упрощение при определении установившихся значений переменных, а именно при определении ω^* приходится решать уравнение не четвертой, а третьей степени.

Следует также отметить, что практическая ценность изложенных результатов (а также аналогичных результатов, полученных тем же методом для двигателей серийных и компаундных) может быть вполне выяснена лишь путем экспериментальной проверки. Как указывалось, всякая система уравнений описывает реальный электропривод лишь весьма схематически. Так, в системе (15) не учтено влияние таких факторов, как индуктивность якоря, взаимоиндуктивность цепи якоря и цепи обмотки возбуждения и т. д. Влияние других факторов учтено лишь приближенно. Например, зависимость момента сопротивления производственной машины от скорости вращения задана в системе (15) посредством параболы второй степени, что далеко не всегда дает более или менее точное приближение к реальной зависимости. Точный учет всех практически важных факторов привел бы (за исключением наиболее простых случаев) к формулам, бесполезным из-за их сложности.

О расчете переходных процессов в электроприводе. При отыскании расчетных формул для переходных процессов приходится иметь дело уже не с качественным (как при отыскании критериев устойчивости), а с количественным исследованием функций, удовлетворяющих заданной системе дифференциальных уравнений; это представляет, естественно, значительно большие трудности. Лишь для так называемых линейных проблем, которым соответствуют системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, удается без большого труда получить расчетные формулы, характеризующие переходные процессы. В огромном большинстве других случаев для получения формул, которые позволяют вычислять значения переменных, соответствующие произвольному моменту времени, приходится или брать весьма небольшой промежуток времени и заниматься численным интегрированием заданной системы дифференциальных уравнений в пределах этого промежутка, или вводить и табулировать специальные функции нового вида. Второй путь представляется, вообще говоря, более желательным, но практически он

осуществим лишь в случае системы дифференциальных уравнений, коэффициенты которых зависят от немногих (от одного до трех) буквенных параметров.

Подобного рода введение и табулирование новых функций было проделано нами³ для решения следующего примера.

Пример. Рассмотрим шунтовой двигатель постоянного тока, скорость вращения которого регулируется потоком возбуждения. Характеристику момента сопротивления производственной машины будем считать прямолинейной. Предположим, что двигатель работает в ненасыщенной части своей характеристики; тогда магнитный поток будет пропорционален току возбуждения. Если пренебречь влиянием индуктивности цепи якоря, взаимоиндуктивностью этой цепи с обмоткой возбуждения, реакцией якоря и некоторыми другими факторами, то система уравнений электропривода запишется в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} U &= Ri + c\Phi\omega, \\ M &= M_c + J\frac{d\omega}{dt}, \\ U &= r_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt}, \\ M &= k\Phi i, \\ \Phi &= ai_s + a_1, \\ M_c &= \alpha + \beta\omega. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Эта система получается из (15), если положить⁴ $\gamma = b = 0$.

Из системы (25) путем исключения переменных можно получить следующее дифференциальное уравнение для переменного ω :

$$\alpha + \beta\omega + J\frac{d\omega}{dt} = k \left[a \left(\frac{U}{r_e} + Ce^{-\frac{r_e}{L_e}t} \right) + \frac{r_e}{L_e} t \right. \\ \left. - c \left[a \left(\frac{U}{r_e} + Ce^{-\frac{r_e}{L_e}t} \right) + a_1 \right] \omega \right] + a_1 \quad (26)$$

Здесь C — произвольная постоянная интегрирования, появляющаяся при определении i_e

$$i_e = \frac{U}{r_e} + Ce^{-\frac{r_e}{L_e}t}.$$

³ Академик В. П. Никитин, В. К. Туркин, Н. П. Куницкий. Аналитический метод исследования работы шунтового двигателя постоянного тока при регулировании скорости вращения потоком возбуждения. Известия АН СССР, Отделение техн. наук, стр. 46 — 56, № 9 — 10, 1943.

⁴ В работе, указанной выше (сноска 3), было принято $a_1 = 0$.

Уравнение (26) посредством замены переменного

$$e^{-\frac{r_e}{L_e}t} = z$$

приводится к виду

$$\frac{d\omega}{dz} = \frac{\gamma + \delta z + \varepsilon z^2}{z} \omega + \frac{\xi + \eta z}{z}, \quad (27)$$

где

$$\gamma = \frac{L_e}{Jr_e} \left[\beta + \frac{ck(Ua + a_1 r_e)^2}{R r_e^2} \right],$$

$$\delta = \frac{2CL_e a c k}{J R r_e} (Ua + a_1 r_e),$$

$$\varepsilon = \frac{C^2 L_e a^2 c k}{J R r_e}$$

$$\xi = \frac{L_e}{Jr_e} \left[\alpha - \frac{Uk(Ua + a_1 r_e)}{R r_e} \right],$$

$$\eta = -\frac{C L_e U a k}{J R r_e}.$$

Общее решение уравнения (27) выражается через введенную нами⁵ функцию:

$$\Psi(v, \lambda, \mu) = \int_1^v e^{-(h^2 + \lambda h)} h^{-\mu} dh.$$

А именно:

$$\begin{aligned} \omega = & e^{\delta} e^{-\frac{r_e}{L_e}t} + \frac{\varepsilon}{2} e^{-\frac{2r_e}{L_e}t} - \gamma \frac{r_e}{L_e} t \left[\xi \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}} \right)^\gamma \times \right. \\ & \times \Psi \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}} e^{-\frac{r_e}{L_e}t}, \delta \sqrt{\frac{2}{\varepsilon}}, \gamma + 1 \right) + \\ & + \eta \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}} \right)^{\gamma-1} \times \\ & \times \Psi \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}} e^{-\frac{r_e}{L_e}t}, \delta \sqrt{\frac{2}{\varepsilon}}, \gamma \right) + C_1 \left. \right]. \quad (28) \end{aligned}$$

Значение произвольного постоянного C_1 в этой формуле может быть определено из начальных условий.

Условие устойчивости состояния динамического равновесия имеет в рассматриваемом случае следующий вид:

$$\beta + ck \frac{(Ua + a_1 r_e)^2}{R r_e^2} > 0.$$

⁵ См. работу, указанную в сноске 3.

Если процесс устойчив, то установившееся значение переменного ω равно

$$\omega^* = \frac{Ukr_e (Ua + a_1 r_e) - R\alpha r_e^2}{R\beta r_e^2 + ck(Ua + a_1 r_e)^2}.$$

Величины J , L_e , r_e положительны, и условие устойчивости можно переписать в виде $\gamma > 0$. Предположим, что это условие выполняется и, следовательно, переходные процессы затухают. Естественно поставить вопрос об определении коэффициента затухания.

С помощью теоремы о среднем значении могут быть доказаны следующие формулы:

$$v^\gamma \Psi(v, \lambda, \gamma) = \frac{v - v^\gamma}{1 - \gamma} v \Lambda(v, \lambda, \gamma),$$

$$v^\gamma \Psi(v, \lambda, \gamma + 1) = -\frac{1 - v^\gamma}{\gamma} - v \Lambda_1(v, \lambda, \gamma),$$

причем

$$\lim_{v \rightarrow 0} \Lambda(v, \lambda, \gamma) = 0,$$

$$\lim_{v \rightarrow 0} \Lambda_1(v, \lambda, \gamma) = \frac{\lambda}{1 - \gamma}.$$

С помощью этих формул можно вывести из (28), что в случае $\gamma < 1$ при больших значениях t имеет место приближенная формула:

$$\begin{aligned} \omega \approx & \omega^* + \left[C_1 + \frac{\xi}{\gamma} \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}} \right)^\gamma + \right. \\ & \left. + \frac{\eta}{\gamma - 1} \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}} \right)^{\gamma-1} \right] e^{-\gamma \frac{r_e}{L_e} t} \end{aligned}$$

и коэффициентом затухания переходного процесса естественно считать величину $-\gamma \frac{r_e}{L_e} t$.

Когда $\gamma > 1$, то при больших значениях t имеет место приближенное равенство:

$$\omega \approx \omega^* + \frac{\delta \xi - \eta}{\gamma - 1} e^{-\frac{r_e}{L_e} t},$$

и коэффициентом затухания естественно называть величину $\frac{r_e}{L_e}$.

Для вычисления мгновенных значений скорости вращения, соответствующих каким-либо заданным значениям времени t , приходится, вообще говоря, пользоваться формулой (28), содержащей значения функции $\Psi(v, \lambda, \mu)$.

Таблицы значений этих функций были вычислены по нашей просьбе работниками Математического института им. Стеклова Академии наук СССР.



О методах определения мощности электродвигателей при переменной нагрузке

Инж. В. И. ПЕТРОВ и канд. техн. наук, доц. И. И. ПЕТРОВ

Настоящая статья базируется на результатах обширного теоретического и экспериментального исследования (около 1 000 опытов над 20 типами асинхронных двигателей), проведенного в 1938–1941 гг., а также на длительном опыте авторов по выбору двигателей, главным образом, для металлорежущих станков.

Основные положения теории нагрева электродвигателей. Основу расчетов мощности электродвигателей составляет определение нагрева их изолированных частей.

Теория нагрева электродвигателей базируется на общезвестном уравнении теплового состояния:

$$Pdt = Cdt + A\tau dt, \quad (1)$$

где P —мощность потерь энергии в двигателе; t —время; C —суммарная теплоемкость двигателя; A —суммарная теплоотдача; τ —превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

Уравнение (1) основано на предположении равенства температуры во всех точках двигателя в любой момент времени, иначе говоря, на предположении бесконечно большой теплопроводности всех частей двигателя. Все другие обычно делаемые допущения и оговорки или излишни, или имеют второстепенное значение.

Уравнение (1) дает достаточно точные и надежные результаты для тел высокой теплопроводности (голые медные провода, шины, некоторые типы реостатов и т. п.). В двигателях вследствие наличия слоев изоляции и воздушных прослоек, обладающих низкой теплопроводностью, теплообмен между отдельными частями машины затруднен. Естественно, возникает необходимость в определении характера величины погрешностей расчета процессов нагрева двигателей по уравнению (1) при различных режимах работы.

Для случая работы двигателя с постоянной нагрузкой ($P = \text{const}$) решение уравнения (1) дает:

$$\tau = \tau_m (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + \tau_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

Рассматриваются вопросы, связанные с расчетом мощности электродвигателей по нагреву, дополняются и уточняются общепринятые методы расчетов и излагаются некоторые физические основы этих расчетов. Приведена новая формула для определения температуры перегрева двигателя в конце цикла, а также предлагается новый принцип расчета двигателей по нагреву, исходя из равенства срока службы изоляции при переменной и постоянной нагрузках.

где $\tau_m = \frac{P}{A}$ —наибольший установившийся перегрев двигателя; $T = \frac{C}{A}$ —постоянная времени нагрева двигателя; τ_0 —перегрев при $t = 0$; e —основание натуральных логарифмов.

Многочисленные измерения нагрева статорных обмоток асинхронных двигателей дали возможность сделать для случая работы с постоянной нагрузкой следующие основные выводы общего значения.

1. Кривая нагрева обмоток при постоянной нагрузке, вообще говоря, не подчиняется экспоненциальному закону. Лишь в последней части кривой (от значения $\tau = 0,5 \div 0,6 \tau_{\max}$ до $\tau = \tau_{\max}$) действительная кривая нагрева с достаточной точностью следует экспоненциальной кривой с определенной постоянной времени T_i ;

2. В начале нагревания действительное повышение температуры обмотки идет быстрее, чем это предусматривает экспонента с постоянной времеми T_i . Рис. 1 дает типичный случай расхождения действительной и теоретической кривых.

При анализе действительных кривых нагрева необходимо исходить из того положения, что при учете конечной теплопроводности тел уравнение теплового состояния приводит к решениям в виде бесконечного ряда экспоненциальных

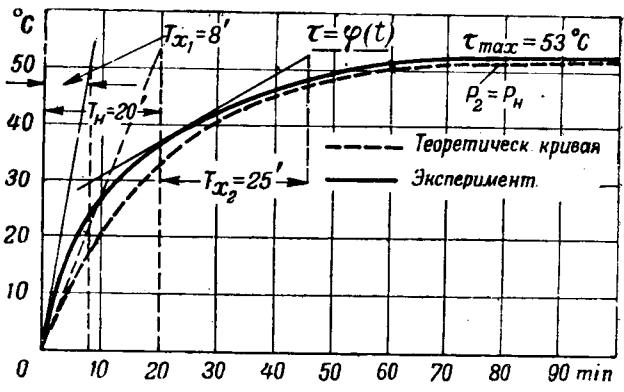


Рис. 1.

Кривые нагрева двигателя с к.з. ротором, $P_H = 14 \text{ kW}$, $n = 1500 \text{ об/мин}$, $T_H = 20 \text{ min}$.

кривых. Экспериментальные кривые нагрева с достаточной точностью могут быть представлены как сумма двух, в некоторых случаях трех, строго экспоненциальных кривых с различными постоянными времени нагрева. В табл. 1 приведены параметры таких трех кривых для трех типов испытанных двигателей.

Таблица 1
Параметры составляющих экспоненциальных кривых, имитирующих кривую нагрева двигателя

| Величина | Тип и мощность двигателя | | |
|--|--------------------------|-------------------|-------------------|
| | АД-52/4 10 kW | АД-51/4 7,8 kW | АД-42/4 5,8 kW |
| Установившийся перегрев обмотки, °C | 57 | 44 | 52 |
| Постоянная времени T_1 первой кривой, мин. . . . | 21,5 | 18,5 | 18,0 |
| Установившийся перегрев первой кривой, °C | 41 | 34 | 42 |
| Постоянная времени T_2 второй кривой, мин. . . . | 2,5 | 1,75 | 1,5 |
| Установившийся перегрев второй кривой, °C | 16 | 10 | 10 |

Для случая работы двигателя при циклической переменной нагрузке обычно расчетное уравнение нагрева дается для ступенчатого графика. Уравнение получается путем последовательного, многократного применения соотношения (2) к отдельным периодам цикла, в течение каждого из которых нагрузка остается постоянной. Однако, если прибегнуть к анаморфозе функции и вместо

$\tau = f(t)$ рассматривать зависимость $\tau = \varphi(e^{-\frac{t}{T}})$, то расчет и анализ может быть проведен в более общем, ясном и значительно менее громоздком виде.

Общее расчетное уравнение для любой циклической переменной нагрузки получается при этом следующим образом.

Приращение температуры двигателя за элемент времени на основании (2) будет:

$$d\tau = -(\tau_m - \tau_0)de^{-\frac{t}{T}}.$$

Легко показать, что после продолжительной работы двигателя при циклическом графике переменной нагрузки температуры двигателя в конце данного и начале следующего цикла одинаковы и приращение температуры за полный цикл равно нулю:

$$\int_{\frac{t_s}{T}}^1 (\tau_m - \tau_0)de^{-\frac{t}{T}} = 0.$$

Из последнего уравнения непосредственно следует, что температура перегрева двигателя в конце цикла

$$\tau_k = \tau_0 = \frac{\int_{\frac{t_s}{T}}^1 \tau_m de^{-\frac{t}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_s}{T}}}, \quad (3)$$

где t_s' — приведенная продолжительность цикла.

Из уравнения (3) следует, что если построить для одного цикла график переменной величины τ_m в функции $e^{-\frac{t}{T}}$, т. е. построить кривую $\tau_m = \frac{P}{A} = f(e^{-\frac{t}{T}})$, то наибольший возможный перегрев двигателя в конце цикла может быть определен как средняя ордината графика.

Если график нагрузки и потерь задан в виде ступенчатой кривой, то, нанеся на оси абсцисс значения $\frac{t}{T}$ в логарифмическом масштабе, уравнение (3) можно написать в виде:

$$\tau_k = \frac{\tau_{m1}t_{e1} + \tau_{m2}t_{e2} + \dots + \tau_{mn}t_{en}}{\sum_{i=1}^n t_{ei}}, \quad (3a)$$

где $t_{e1}, t_{e2}, \dots, t_{en}$ — отрезки оси абсцисс, соответствующие отдельным периодам цикла.

Имея в виду, что $\tau_{m1} = \frac{P_1}{A}; \tau_{m2} = \frac{P_2}{A} \dots \tau_n = \frac{P_n}{A}$, и вводя понятие об эквивалентных потерях P_{ek} , которые при длительной работе обуславливают такой же нагрев двигателя, как и нагрев в конце цикла при данном графике переменной нагрузки ($\tau_k = \frac{P_{ek}}{A}$), уравнение (3a) можно преобразовать:

$$P_{ek} = \frac{P_1 t_{e1} + P_2 t_{e2} + \dots + P_n t_{en}}{\sum_{i=1}^n t_{ei}}. \quad (36)$$

Последнее уравнение совершенно аналогично по форме общизвестному уравнению средних потерь и с расчетной точки зрения отличается от него только тем, что в графике потерь на оси абсцисс принят логарифмический масштаб вместо равномерного. Подобные графики в полулогарифмической сетке общизвестны и их построение не вызывает затруднений¹.

Многочисленные измерения нагрева статорных обмоток асинхронных двигателей при работе по разнообразным графикам переменной нагрузки, проведенные с целью выяснения возможности применения в практических расчетах уравнения (3), привели к следующим основным выводам.

1. Кривые нагрева при переменной нагрузке значительно больше отклоняются от экспоненты, чем при постоянной нагрузке.

1 Из уравнений (3) и (36) непосредственно вытекает возможность графических методов расчета, простых и достаточно точных. Аналогично тому, как это было сделано для уравнения (3), также легко доказать существование продолжительного нагрева при циклической переменной нагрузке и экспоненциальность огибающих кривых в температурных графиках при этой нагрузке. Из уравнения (3) также следует, что преобразование графиков переменной нагрузки, заданных в виде плавной кривой, в ступенчатые графики

необходимо вести, исходя из кривой $P_{\partial} = f(e^{-\frac{t}{T}})$, а не из кривой вида $P_{\partial} = \varphi(t)$.

На рис. 2 приведена типичная кривая нагрева за цикл при повторно-кратковременном режиме.

2. В случае расчета перегрева двигателя на основании уравнения (3) для определения наибольших достигаемых температур, согласующихся с опытными данными, для каждого графика нагрузки необходимо вводить в расчет соответствующее данному графику значение постоянной времени нагрева. Если вести расчет с одной и той же постоянной времени нагрева T_i для различных графиков нагрузки и при этом определить эту постоянную из экспоненциальной части кривой нагрева двигателя при постоянной нагрузке, то расчетные температуры перегрева всегда оказываются ниже, чем действительно наблюдаемые температуры перегрева.

стационарная времени нагрева $T_i \approx 18 \text{ min}$ была определена из экспоненциальной части кривой нагрева при длительной номинальной нагрузке. Величина средних потерь энергии в двигателе во всех режимах одинакова.

Не только в приведенном примере, но и во всех других опытах имело место отклонение расчетных температур всегда в сторону уменьшения против действительно наблюдаемых и тем больше, чем меньше относительная продолжительность включения и чем больше длительность цикла. При этом для ПР = 25% и $t_u = 10 \text{ min}$, для двигателей мощностью от 3,0 до 10,0 kW ошибка расчета лежит в пределах 30–60%.

Все приведенные данные и наблюдения показывают, что процессы нагрева двигателей, осо-

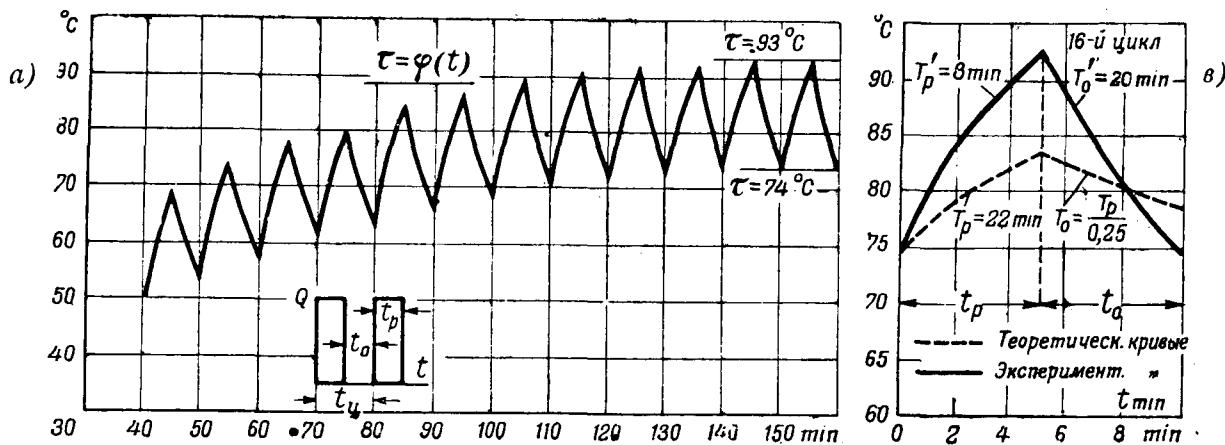


Рис. 2.

а — кривая нагрева двигателя с к. з. ротором, $P_H = 5,2 \text{ kW}$, $n = 1500 \text{ об/мин}$, $T_H = 20 \text{ min}$ при повторно-кратковременном режиме работы (ПВ = 50%; $t_u = 10 \text{ min}$, $P_0 = 1,5 P_H$); б — кривая нагрева тс же двигателя в пределах 16-го цикла.

В табл. 2 в качестве примера приведено сравнение расчетных и опытных данных перегрева статорной обмотки для двигателя типа АД-42/4 ($P_H = 5,8 \text{ kW}$, $n_s = 1500 \text{ об/мин}$), работавшего в различных режимах повторно-кратковременной нагрузки. Принятая при расчете по-

бенно при резко-переменной нагрузке, значительно отличаются от экспоненциального закона. Представление о том, что для каждого двигателя может быть определена и указана одна определенная постоянная времени нагрева, является в большой степени условным. Использование и определение этой постоянной в расчетах должно сопровождаться многими и существенными ограничениями и дополнительными условиями.

Основные принципы существующих методов расчета мощности двигателей при переменной нагрузке. В § 70 ГОСТ 183-41 сказано: „При номинальном режиме работы машины превышения температур отдельных частей машины должны быть не выше тех, которые устанавливаются настоящим стандартом как высшие пределы“.

Стандарт рассматривает лишь номинальные режимы работы. Однако принцип предельных температур сформулирован в нем совершенно отчетливо. Поэтому при всех других режимах работы двигателей в теории и на практике руководствуются этим правилом и указанными в стандарте предельными температурами. Расчет мощности двигателей при переменной нагрузке сводится при этом к тому, чтобы определить

Таблица 2

Наибольшая температура перегрева статорной обмотки двигателя типа АД-42/4, $P_H = 5,8 \text{ kW}$, при повторно-кратковременной нагрузке

| Относительная продолжительность цикла (ПВ), % | Длительность цикла, min | Наибольшая температура перегрева в конце рабочего периода, °C | | Отношение действительного перегрева к расчетному |
|---|-------------------------|---|----------|--|
| | | по расчету при $T_i = 18 \text{ min}$ | из спыта | |
| τ_i | τ | $\frac{\tau}{\tau_i}$ | | |
| 60 | 5,0 | 54,0 | 56,0 | 1,04 |
| 60 | 10,0 | 56,0 | 61,0 | 1,09 |
| 60 | 15,0 | 57,0 | 65,0 | 1,14 |
| 40 | 5,0 | 54,5 | 63,0 | 1,15 |
| 40 | 10,0 | 57,5 | 74,0 | 1,28 |
| 40 | 15,0 | 60,0 | 78,0 | 1,30 |
| 25 | 5,0 | 56,0 | 70,0 | 1,25 |
| 25 | 10,0 | 60,0 | 91,0 | 1,52 |

наибольшую возможную температуру τ_{\max} двигателя при работе с переменной нагрузкой и проверить выполнение условия

$$\tau_{\max} \leq \tau_n, \quad (4)$$

где τ_n — наибольший перегрев двигателя при номинальном для него режиме работы. Предполагается, что маркировка двигателя произведена таким образом, что его перегрев и температура при номинальном режиме соответствуют предельно допустимым по стандарту. Указанному принципу расчета и соответствуют уравнения (3) и (3б), которые являются основными уравнениями метода расчета по предельным максимальным температурам.

Однако этот принцип расчета, несмотря на узаконение его стандартом и принятие его за основу теорией электропривода, не получил широкого распространения в промышленной практике по причинам — громоздкости существующих методов расчета, отсутствия данных о постоянной времени и условности этой величины и, наконец, несомненно, недостаточной надежности и точности результатов расчета.

Фактически на практике в подавляющем числе случаев определение мощности двигателей при переменной нагрузке производят на основании так называемого уравнения средних потерь:

$$P_{\text{ср}} = \frac{\int_0^{t_s} P dt}{t_s'}. \quad (5)$$

В теории электропривода основное уравнение расчета по средним потерям получается формальным путем из уравнения расчета по максимальным температурам с помощью приближенного равенства:

$$e^{-\frac{t}{T}} \approx 1 - \frac{t}{T}, \quad (6)$$

в предположении, что $\frac{t}{T}$ — правильная и притом достаточно малая дробь.

Действительно, если подставить (6) в (3), то уравнение (3) преобразуется в уравнение средних потерь, так как при этом:

$$\tau_n = \frac{\int_e^{\frac{t_s}{T}} \tau_m de - \frac{t}{T}}{1 - e} \approx \frac{\int_0^{t_s'} \tau_m dt}{t_s'}, \quad (6a)$$

или

$$P_{\text{ср}} = \frac{\int_e^{\frac{t_s}{T}} P de - \frac{t}{T}}{1 - e} \approx \frac{\int_0^{t_s'} P dt}{t_s'}. \quad (6b)$$

Таким образом, теория получает уравнение средних потерь, как приближенное выражение (3), и расчет по этому методу рассматривается лишь как приближенный расчет по принципу предельных температур.

В действительности дело обстоит совсем не так. Уравнение средних потерь по своему физическому смыслу коренным образом отличается от расчетного уравнения (3). Расчет по уравнению средних потерь позволяет определить не предельную максимальную температуру, а среднюю температуру за цикл. Другими словами, расчет по средним потерям базируется не на соблюдении условия (4), а на условии:

$$\tau_{cp} = \tau_n, \quad (7)$$

где τ_{cp} — средняя за цикл наибольшая температура перегрева двигателя при переменной нагрузке и $\tau_n = \frac{\tau_n}{A_n}$ — температура перегрева того же двигателя при номинальном режиме работы. Действительно, при циклической переменной нагрузке количество тепла, отдаваемого двигателем за один полный цикл окружающей среде,

$$\int_0^{t_s} \tau A dt = \tau_{cp} A_n t_s';$$

количество тепла, выделяемого в двигателе за один цикл,

$$\int_0^{t_s} P dt t_s'.$$

После продолжительной работы двигателя по данному графику нагрузки, очевидно,

$$\tau_{cp} A_n t_s' = \int_0^{t_s} P dt,$$

так что по условию (7)

$$\tau_n = \tau_{cp} = \frac{\int_0^{t_s} P dt}{A_n t_s'}$$

или, обозначая $\tau_{cp} = \frac{P_{\text{ср}}}{A_n}$, получим уравнение средних потерь

$$P_n = P_{\text{ср}} = \frac{\int_0^{t_s} P dt}{t_s'}.$$

Таким образом, если при переменной нагрузке средние потери за один цикл равны номинальным потерям в двигателе, то и средняя наибольшая возможная температура двигателя при переменной нагрузке равна температуре перегрева при номинальном режиме.

Отчетливое осознание высказанного положения является совершенно необходимым для надежного и уверенного использования в практических расчетах метода средних потерь.

В руководствах по электроприводу соответственно формальному способу получения уравнения

² Вывод уравнения средних потерь дан здесь в рамках классической теории нагрева. Надо, однако, заметить, что введение конечной теплопроводности не изменит существа дела.

нения средних потерь пределы применения этого уравнения обычно ставятся в зависимость только от продолжительности цикла, так как от этого зависит величина отношения $\frac{t_s}{T}$. Обычно при

этом доказывается, что при длительности цикла переменной нагрузки не более 10 min погрешность расчета по средним потерям по сравнению с результатом, получаемым на основе принципа максимальных температур, в самых неблагоприятных случаях составляет всего несколько процентов. Однако это утверждение не согласуется с экспериментальным исследованием, проведенным для двигателей, наиболее распространенных в приводе станков.

В табл. 3 в качестве примера приведены некоторые результаты измерений и расчетов для различных режимов повторно-кратковременной нагрузки трех типов двигателей. При всех режимах величина нагрузки подбиралась таким образом, что средние за цикл потери энергии в двигателе были равны потерям при номинальном длительном режиме.

Таблица 3

Максимальный и средний перегревы обмотки статора двигателей за цикл при повторно-кратковременной нагрузке

| Данные двигателя и перегрев (°C) его при номинальном режиме | Режим работы | | Температура перегрева статора обмотки из опыта, °C | | Отношение температур | |
|---|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| | $\frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100$, % | $t_s = t_p + t_0$, min | средняя за цикла τ_{cp} | максимальная за цикл τ_{max} | $\frac{\tau_{max}}{\tau_{cp}}$ | $\frac{\tau_n}{\tau_{cp}}$ |
| АД-51/4; $P_n = 7,8 \text{ kW}$; $\tau_n = 43^\circ$ | 60 | 10 | 39,7 | 50,0 | 1,26 | 1,08 |
| | 40 | 10 | 39,3 | 58,0 | 1,48 | 1,09 |
| | 25 | 10 | 42,5 | 74,0 | 1,74 | 1,01 |
| | 15 | 10 | 45,6 | 93,0 | 2,04 | 0,95 |
| АД-42/2; $P_n = 5,8 \text{ kW}$; $\tau_n = 47^\circ$ | 60 | 5 | 46,0 | 56,0 | 1,22 | 1,02 |
| | 60 | 10 | 47,0 | 61,0 | 1,30 | 1,00 |
| | | 15 | 49,0 | 65,0 | 1,33 | 0,96 |
| | 40 | 5 | 47,0 | 63,0 | 1,34 | 1,00 |
| | 40 | 10 | 46,0 | 74,0 | 1,58 | 1,02 |
| | 40 | 15 | 49,0 | 78,0 | 1,60 | 0,96 |
| АД-52/4; $P_n = 10,0 \text{ kW}$ $\tau_n = 58^\circ$ | 40 | 2,5 | 58,4 | 64,5 | 1,11 | 0,99 |
| | 40 | 5,0 | 57,3 | 71,7 | 1,25 | 1,01 |
| | 40 | 10,0 | 61,0 | 86,0 | 1,41 | 0,95 |
| | 25 | 2,5 | 59,5 | 73,5 | 1,24 | 0,98 |
| | 25 | 5,0 | 59,5 | 78,0 | 1,31 | 0,98 |
| | 25 | 10,0 | 60,7 | 98,0 | 1,61 | 0,96 |

Приведенные в табл. 3 данные и результаты других многочисленных измерений позволяют сделать следующее заключение.

Расчет по средним потерям есть не только простой и удобный, но вместе с тем и вполне точный метод, что и понятно, так как вывод уравнения (5) не содержит грубых допущений. При равенстве средних и номинальных потерь энергии в двигателе средняя температура очень мало отличается от номинальной и почти не зависит от режима работы. Небольшие колебания

средней температуры определяются, главным образом, перераспределением потерь энергии между отдельными частями двигателя при разных режимах работы.

Средняя температура значительно отличается от максимальной. Естественно поэтому, что уравнение средних потерь не может ни в какой мере рассматриваться как уравнение для расчета по максимальной температуре.

Разница между максимальной и средней температурами зависит не только от длительности цикла переменной нагрузки, но еще в большей степени от продолжительности включения или, обобщенно, от состава графика. Эта разница тем больше, чем меньше продолжительность включения или, что то же для сложных графиков, чем более резко-переменный характер имеет нагрузку.

Основной вывод, который должен быть сделан в данной части статьи, заключается в том, что обычное изложение всех методов, базирующихся на одном и том же принципе и отличных лишь по степени их точности, не является достаточно оправданным и правильным. Следует различать два принципа расчета — по максимальной и по средней температуре.

Принцип определения мощности электродвигателей при переменной нагрузке по эквивалентной температуре. За последнее время ряд авторов опубликовал результаты исследования вопросов о влиянии температуры на срок службы изоляции. Основной не вызывающий разногласий вывод из этих исследований сводится к тому, что срок службы волокнистой изоляции органического происхождения в зависимости от температуры определяется следующим уравнением:

$$D = a e^{-b\theta}, \quad (8)$$

где D — срок службы изоляции; θ — температура изоляции; a и b — коэффициенты, числовые значения которых устанавливаются экспериментально.

Применительно к двигателям весьма важно установить, насколько справедливо уравнение (8) при непрерывно изменяющейся температуре изоляции. Этот вопрос пока еще почти вовсе не исследован.

Для того чтобы математически сформулировать эквивалентность температурных условий работы изоляции в двигателях при переменной и постоянной нагрузках, приходится сделать допущение, что уравнение (8) справедливо при любой скорости изменения температуры и что коэффициент b сохраняет при этом одно и то же значение. Это допущение в дальнейшем должно быть проверено и уточнено.

Величина, обратная сроку службы изоляции, может быть названа коэффициентом изнашиваемости изоляции и выражена следующим образом:

$$d = \frac{1}{D} = a^{-1} e^{b\theta} \quad (8a)$$

При длительной неизменной нагрузке, имея в виду, что $\theta = \theta_0 + \tau_n$,

$$d_n = a^{-1} e^{b\theta_0} e^{b\tau_n},$$

где θ_0 — температура окружающей среды и τ_n — перегрев при номинальной нагрузке.

При переменной нагрузке, на основании указанного выше допущения о постоянстве, коэффициент b за время t_x

$$d_{cp} = \frac{e^{b\theta_0}}{at_x} \int_0^{t_x} e^{b\tau} dt = a^{-1} e^{b\theta_0} (e^{b\tau})_{cp}.$$

Для эквивалентности температурных условий работы изоляции двигателя при переменной и постоянной нагрузках, очевидно, необходимо, чтобы

$$d_n = d_{cp} \text{ или } e^{b\tau_n} = (e^{b\tau})_{cp}. \quad (9)$$

На основании равенства (9) может быть образовано понятие „эквивалентной“ температуры перегрева для переменной нагрузки, если положить:

$$(e^{b\tau})_{cp} = e^{b\tau_{ek}},$$

где τ_{ek} — эквивалентная температура, равная

$$\tau_{ek} = \frac{1}{b} \ln \frac{1}{t_x} \int_0^{t_x} e^{b\tau} dt. \quad (10)$$

Принцип расчета мощности двигателя при переменной нагрузке по эквивалентной температуре определяется условием:

$$\tau_{ek} \leq \tau_n.$$

Если имеется график температуры двигателя при переменной нагрузке, полученный из расчета или эксперимента, то определение из него значения τ_{ek} графическим путем весьма несложно.

Значения коэффициента b еще не установлены твердо. В качестве первого приближения на основании рекомендации ряда авторов можно принять $b = 0,0693$, что соответствует уменьшению вдвое срока службы изоляции при каждом повышении ее температуры на 10° . Эквивалентные температуры, вычисленные на основе данных эксперимента для двигателя АД-51/4, $P_n = 7,8 \text{ kW}$, работавшего при повторно-кратковременном режиме при средних потерях, равных номинальным, в сопоставлении со средними и максимальными температурами приведены в табл. 4. Установлено

Таблица 4

Эквивалентная по условиям старения изоляции температура обмотки статора двигателя АД-51/4, $P_n = 7,8 \text{ kW}$, при повторной-кратковременной нагрузке

| Режим работы | Температуры из опыта, $^\circ\text{C}$ | | | | Отношение температур | |
|--|--|-----------------------------|---------------------------|--------------|----------------------|-------------|
| | эквивалентная при $b=0,0693$ | средняя за цикл τ_{cp} | максимальная τ_{max} | τ_{max} | τ_{cp} | τ_{ek} |
| ПВ = $\left(\frac{t_p}{t_p + t_0} \right) \cdot 100 \%$ | t_0 t_p t_{ek} | | | | | |
| 60 | 5 | 40,2 | 39,5 | 50,0 | 1,24 | 0,98 |
| 60 | 10 | 41,3 | 39,7 | 50,0 | 1,21 | 0,96 |
| 60 | 15 | 42,2 | 39,9 | 51,5 | 1,22 | 0,95 |
| 40 | 5 | 40,7 | 39,3 | 51,0 | 1,25 | 0,96 |
| 40 | 10 | 43,5 | 39,3 | 58,0 | 1,33 | 0,91 |
| 40 | 15 | 46,1 | 39,8 | 62,6 | 1,35 | 0,86 |
| 25 | 5 | 44,5 | 39,5 | 57,5 | 1,29 | 0,89 |
| 25 | 10 | 50,2 | 42,5 | 74,0 | 1,47 | 0,85 |
| 25 | 15 | 55,3 | 42,1 | 83,5 | 1,51 | 0,76 |
| 15 | 5 | 50,6 | 47,5 | 72,0 | 1,42 | 0,70 |
| 15 | 10 | 61,2 | 45,6 | 93,0 | 1,52 | 0,75 |

новившаяся температура перегрева при продолжительной номинальной нагрузке для рассматриваемого двигателя равна 43°C . Из таблицы следует, что всегда $\tau_{max} > \tau_{ek} > \tau_{cp}$. При этом максимальная и средняя температуры будут тем более отличаться от эквивалентной, чем больше будет продолжительность цикла и чем меньше продолжительность включения.



Анализ работы компаундированного синхронного генератора

Кандидат техн. наук И. И. КОДКИНД

Московский энергетический институт им. Молотова

Графоаналитический метод анализа установившихся режимов. Для анализа работы компаундированных синхронных генераторов обычно пользуются уравнениями, получаемыми на основе **апрямления** характеристик отдельных элементов, которые входят в систему возбуждения генератора. При этом найденные значения искомых величин соответствуют действительным только в одном или в двух режимах. В других режимах при данном спрямлении эти величины определяются с большой погрешностью. Чтобы учесть влияние нелинейности характеристик отдельных элементов системы возбуждения, целесообразно использовать графоаналитическое решение, которое помимо уточнения дает наглядную картину взаимосвязи отдельных величин.

Ниже дается подобное решение для параллельно-токовой системы компаундирования, получившей наибольшее применение. Схема цепей возбуждения приведена на рис. 1. Для обмотки возбуждения возбудителя и ее контура 1 можно написать следующие основные уравнения:

$$i_e = i_{e.e} + i_{k.e}, \quad (1)$$

$$U_e = i_{k.e} R_e + i_{e.e} (R_e + R_w), \quad (2)$$

где i_e — ток обмотки возбуждения возбудителя; $i_{e.e}$ — составляющая тока обмотки возбуждения возбудителя, получаемая от якоря возбудителя; $i_{k.e}$ — составляющая тока обмотки возбуждения возбудителя, получаемая от системы компаундирования; U_e — напряжение на клеммах возбудителя; U_k — напряжение на обмотке возбуждения возбудителя; R_e — сопротивление обмотки возбуждения возбудителя; R_w — сопротивление незащоренной части шунтового реостата.

Преобразуя уравнения (1) и (2), получаем:

$$i_{k.e} R_w = i_e (R_e + R_w) - U_e, \quad (3)$$

$$i_{k.e} = i_e - \frac{U_e - i_e R_e}{R_w}, \quad (3')$$

$$i_{e.e} R_w = U_e - i_e R_e. \quad (4)$$

Дан наглядный графоаналитический метод анализа режимов системы возбуждения синхронного генератора, оборудованного параллельно-токовой системой компаундирования. Установлена связь между системами токового компаундирования и пропорционального регулирования по отклонению напряжения, что позволяет распространить результаты анализа последней системы на первую.

Зная нагрузочную характеристику возбудителя $U_e = f(i_e)$ и строя прямые $i_{k.e} (R_e + R_w)$ и $i_{e.e} R_e$, можно получить графическое решение уравнений (3) и (4) и определить режим системы компаундирования ($i_{k.e}$; U_k), необходимый для обеспечения заданного режима возбуждения генератора.

Подобное построение, изображенное на рис. 2 для данного напряжения U_e , позволяет получить отрезки пропорциональные: 23' — току $i_{k.e}$; 23 — току $i_{e.e}$ и 34 — напряжению U_k и видеть, как должен меняться режим системы компаундирования для изменения возбуждения генератора. Это же построение определяет следующие основные положения, характеризующие режим системы возбуждения компаундированного генератора:

1. Процесс компаундирования начинается при значении напряжения $U_k > U_e$, (последнее определяется величиной сопротивления R_w), т. е. при конечных значениях тока статора, величина которого в начальном режиме составляет 5—10%.

2. Процесс начинается тем ранее, чем больше величина сопротивления R_w . При этом, однако, как видно из уравнения (3'), увеличивается вели-

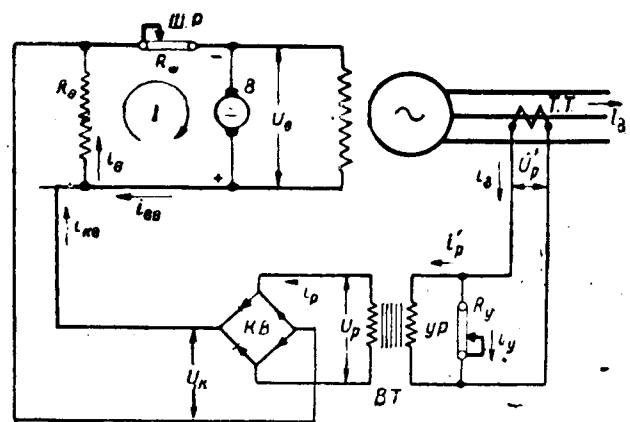


Рис. 1.

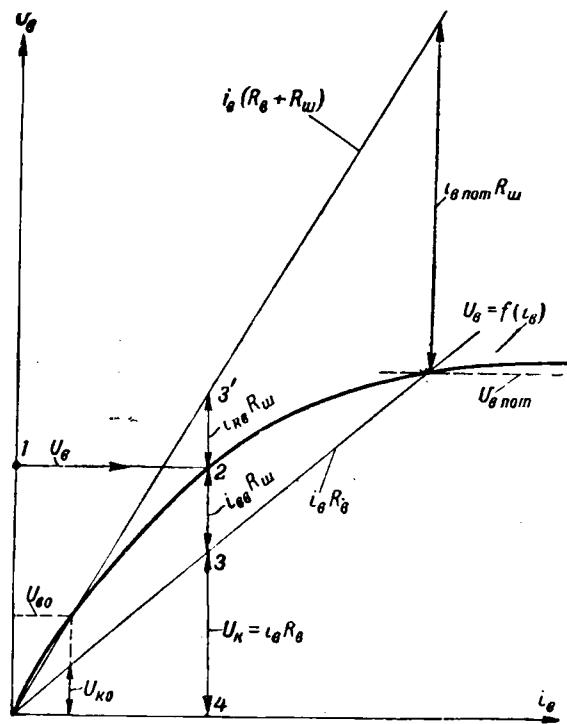


Рис. 2.

чина компаундирующего тока, необходимого для получения заданного режима возбуждения (отличного от потолочного).

3. Увеличение компаундирующего тока происходит значительно быстрее роста обеспечивающего им возбуждения. С ростом последнего ток от якоря $i_{\text{як}}$ сначала увеличивается, а затем начинает уменьшаться и в режиме естественного потолка¹ достигает нуля, вследствие чего обмотка возбуждения возбудителя получает питание только от системы компаундирования.

4. Выбор коэффициента трансформации выпрямительного трансформатора и величины сопротивления установочного реостата ограничиваются условием обеспечения номинального режима генератора. Уравнение (3') показывает, что увеличения коэффициента компаундирования ($k = \frac{\Delta F_{de\infty}}{\Delta I_{CT}}$) можно достигнуть увеличением сопротивления R_w , максимально допустимое значение которого соответствует номинальному напряжению в режиме холостого хода генератора.

5. Для получения заданного возбуждения генератора необходим однозначно определенный режим системы компаундирования в части цепей постоянного тока. Напряжение, ток и мощность, потребляемые обмоткой возбуждения возбудителя от системы компаундирования, определяются настройкой системы в цепях постоянного тока и не зависят от выполнения системы ком-

¹ Под „естественным“ потолком подразумевается максимальное возбуждение при отключенной системе компаундирования, получаемое при закорачивании всех добавочных сопротивлений в цепи обмотки возбуждения возбудителя.

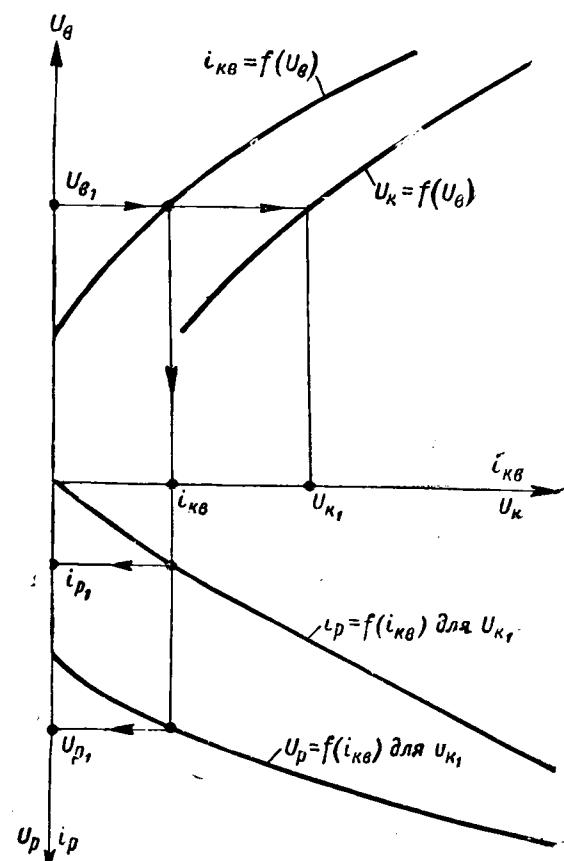


Рис. 3.

паундирования в части цепей переменного тока.

Зависимости $U_k = f(U_\theta)$ и $i_{k,\theta} = f(U_\theta)$ изображены на рис. 3, из которого также видно, как по вольтамперной характеристике купроксовых выпрямителей² получаются соответствующие значения тока и напряжения на вторичной обмотке выпрямительного трансформатора. По известным коэффициентам трансформации выпрямительного трансформатора, трансформатора тока и сопротивлению установочного реостата можно определить зависимость режима вторичной обмотки выпрямительного трансформатора от тока статора генератора. В конечном же счете можно получить зависимость возбуждения генератора от тока статора.

Такая зависимость (изображенная на рис. 4) является одной из основных характеристик генератора, который оборудован токовой системой компаундирования. Используя ее, можно путем обычных графических построений проводить анализ режимов компаундированного генератора. Аналогично проведенному выше анализу для случая возбудителя с самовозбуждением проводится построение для случая возбудителя с независимым возбуждением.

² Вольтамперные характеристики купроксовых выпрямителей представляют собой семейство кривых $U_p = f(i_{k,\theta})$ и $i_p = f(i_{k,\theta})$ для различных значений U_k . Характеристики снимаются для данной схемы комплектования купроксовых шайб при работе их на внешнее сопротивление.

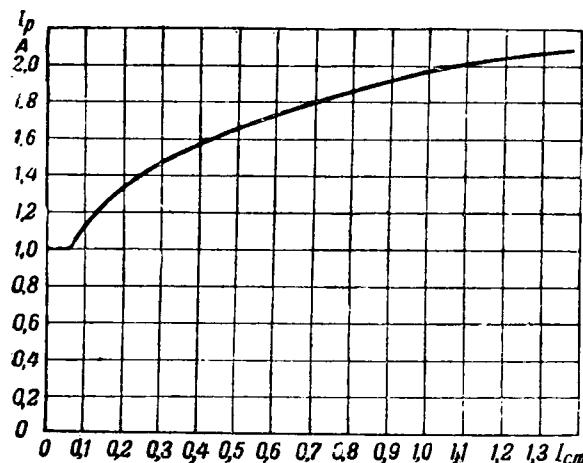


Рис. 4.

Анализ устойчивости работы компаундированного синхронного генератора. Устойчивость работы компаундированного генератора обычно исследуется путем совместного решения уравнений движения ротора, переходных процессов в генераторе и возбудителе и уравнения регулирования [Л. 1]. При этом для облегчения анализа в первом приближении опускается влияние ряда промежуточных элементов системы. Ниже устанавливается связь между уравнением регулирования системы токового компаундирования и уравнением системы пропорционального регулирования по отклонению напряжения, что позволяет распространить на первую систему результаты подробного анализа второй системы [Л. 2].

Как известно, уравнения регулирования имеют вид для токовых систем компаундирования

$$dE_{de\infty} = k dI_{ct} \quad (5)$$

и для системы пропорционального регулирования по отклонению напряжения:

$$dE_{de\infty} = -b dU_r. \quad (6)$$

Здесь $dE_{de\infty}$ — изменение напряжения возбудителя в установившемся режиме; dI_{ct} — изменение тока статора; k — коэффициент компаундирования; $\frac{1}{b}$ — коэффициент статизма регулятора и dU_r — изменение напряжения на выводах генератора.

Из уравнений (5) и (6) можно получить значение коэффициента статизма, эквивалентного данной величине коэффициента компаундирования

$$b = -k \frac{dI_{ct}}{dU_r}. \quad (7)$$

Для целей вычислений удобнее дать зависимость $b = f(k)$, выраженную через частные производные величин, по э. д. с. холостого хода E_d и углу вылета δ .

Напишем следующие соотношения:

$$dI_{ct} = \frac{\partial I_{ct}}{\partial E_{de\infty}} dE_{de\infty} + \frac{\partial I_{ct}}{\partial \delta} d\delta = k \frac{\partial I_{ct}}{\partial E_{de\infty}} dI_{ct} +$$

$$+ \frac{\partial I_{ct}}{\partial \delta} d\delta; \quad \frac{dI_{ct}}{d\delta} = \frac{\frac{\partial I_{ct}}{\partial \delta}}{1 - k \frac{\partial I_{ct}}{\partial E_{de\infty}}};$$

$$dU_r = \frac{\partial U_r}{\partial E_{de\infty}} dE_{de\infty} + \frac{\partial U_r}{\partial \delta} d\delta = -b \frac{\partial U_r}{\partial E_{de\infty}} dU_r +$$

$$+ \frac{\partial U_r}{\partial \delta} d\delta; \quad \frac{dU_r}{d\delta} = \frac{\frac{\partial U_r}{\partial \delta}}{1 + b \frac{\partial U_r}{\partial E_{de\infty}}},$$

тогда

$$\frac{dI_{ct}}{dU_r} = -\frac{b}{k} = \frac{\left(1 + b \frac{\partial U_r}{\partial E_{de\infty}}\right) \frac{\partial I_{ct}}{\partial \delta}}{\frac{\partial U_r}{\partial \delta} \left(1 - k \frac{\partial I_{ct}}{\partial E_{de\infty}}\right)}. \quad (8)$$

Решая уравнение (8) относительно k или b , получим значение коэффициента статизма $\frac{1}{b}$, эквивалентного данному значению коэффициента компаундирования k , или обратное значение k , эквивалентное данному значению $\frac{1}{b}$

$$b = \frac{k \frac{\partial I_{ct}}{\partial \delta}}{-\frac{\partial U_r}{\partial \delta} + k \left(\frac{\partial I_{ct}}{\partial E_{de\infty}} \frac{\partial U_r}{\partial \delta} - \frac{\partial I_{ct}}{\partial \delta} \frac{\partial U_r}{\partial E_{de\infty}} \right)}, \quad (9)$$

$$K = -\frac{b \frac{\partial U_r}{\partial \delta}}{-\frac{\partial I_{ct}}{\partial \delta} + b \left(\frac{\partial I_{ct}}{\partial E_{de\infty}} \frac{\partial U_r}{\partial \delta} - \frac{\partial I_{ct}}{\partial \delta} \frac{\partial U_r}{\partial E_{de\infty}} \right)}. \quad (10)$$

Выражение (9) позволяет использовать результаты анализа системы пропорционального регулирования для анализа систем токового компаундирования. Так, например, подставляя минимально допустимое по условиям устойчивости значение статизма для систем пропорционального регулирования (с учетом только переходного процесса в генераторе, но не влияния насыщения и демпферного действия) соответственно

$$b_{\max} = \frac{\frac{\partial P}{\partial U_r} (S_{E'd} - S_{Ed})}{\frac{\partial P}{\partial E_d} (S_{U_r} - S_{E'd})}$$

в выражение (9) и преобразуя его, получаем максимально допустимое значение коэффициента компаундирования

$$k_{\max} = \frac{S_{E'd} - S_{Ed}}{\frac{\partial P}{\partial E_d} \frac{\partial I_{ct}}{\partial \delta} + (S_{E'd} - S_{Ed}) \frac{\partial I_{ct}}{\partial E_d}},$$

Литература

- Л. В. Цукерник. Установившийся режим и условия устойчивости компаундированного синхронного генератора. Вестник электропромышленности, № 9, 1943.
- С. А. Лебедев и др. Устойчивость электрических систем. Госэнергоиздат, 1940.



Новые теплостойкие диэлектрики—силиконы

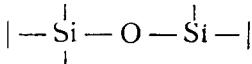
Доктор техн. наук, проф. К. А. АНДРИАНОВ, инж. О. И. ГРИБАНОВА,
инж. Д. А. ГАМБАРОВА и инж. А. Л. КАРПОВА

Всесоюзный электротехнический институт

Кремний и кислород являются наиболее распространенными элементами земной коры, широко используемыми в технике в виде кремнезема и силикатов.

В течение последнего столетия были синтезированы соединения кремния с водородом, галоидами и другими элементами, имеющими совершенно другой характер, чем силикаты, и не встречающиеся в природе. Многие из них летучи, некоторые — нестойки, а другие в высшей степени реактивны к воде и кислороду. Соединения кремния с углеродом, т. е. кремнийорганические соединения, являются весьма стабильными, даже более чем их аналоги в химии углерода (например, тетрафенилсилан $(C_6H_5)_4Si$ — кристаллическое вещество перегоняется без разложения при температуре красного каления).

Для создания теплостойких кремнийорганических высокополимерных соединений необходимо синтезировать молекулы, в которых содержатся термически устойчивые связи: углерод, связанный с кремнием, и цепи молекул, построенные из силоксанных



группировок атомов.

На это обратили внимание впервые в СССР, где были опубликованы исследования, в которых доказана принципиальная возможность синтеза кремнийорганических смол и пленкообразующих веществ (силиконов) и установлен механизм образования и строения их. Эти работы положили начало новой, сулящей большие перспективы отрасли химии [Л. 1, 2, 3].

В США в 1941 г. была опубликована первая работа по силиконам, в которой подтверждены данные, полученные в СССР [Л. 4]. До опубликования указанных работ силоксанская структура была раньше известна только для таких неорганических полимеров, как кварц, стекло, асбест, силикаты. В кристалле кварца каждый атом кремния связан с четырьмя отдельными атомами кислорода, а каждый атом кислорода в свою очередь связан с двумя атомами кремния. В ре-

Установлена возможность получения химически стабильных и стойких к действию окисления новых кремнийорганических жидких и твердых диэлектриков — силиконов — с малым изменением физических и, в частности, электрических свойств от температуры. Использование силиконов в качестве электроизоляции позволит значительно уменьшить размеры и вес электрических машин и аппаратов без уменьшения продолжительности срока их службы.

зультате этого образуются спиральные силоксановые цепи, связанные в жесткие решетки поперечными связями, обладающими высокой температурой плавления и малой растворимостью.

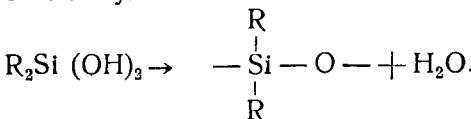
В высокополимерных кремнийорганических соединениях, которые рассматриваются в данной статье, цепи молекул построены также за счет силоксанных группировок атомов кремния и кислорода, как и у кварца, но с тем отличием, что атомы кремния в молекулах связаны не только с кислородом, но и с органическими радикалами (R).

Все степени модификации силоксанных структур являются возможными, начиная от двукиси кремния (кварца) и до диалкил- или диарилсиликонов. Степень замещения органическими радикалами определяет наличие и число поперечных связей и, таким образом, влияет на свойства полимеров.

Растворимость, плавкость и т. п. сильно зависят от числа и наличия поперечных связей. Механические и химические свойства меняются в зависимости от типа и числа радикалов, связанных с атомами кремния. Отсюда видно, насколько широки возможности получения различных высокополимерных кремнийорганических веществ, причем каждое из них отличается от другого величиной радикала, соотношением R/Si , величиной молекулы полимера и т. д. Это равнозначно присоединению органических радикалов различной величины к основной решетке, состоящей из атомов кремния и кислорода, так же как обусловливающие модификацию группы, присоединенные к решетке углерод — углерод для известных органических высокополимерных соединений. Следовательно, возможности получения различных кремнийорганических высокополимерных соединений также обширны, как и области взятых вместе органических полимеров.

Такая силоксанная структура цепей молекул кремнийорганических соединений и обуславливает их исключительную термическую стабильность. Однако не только термическая стабильность характерна для обсуждаемых соединений:

химический состав кремнийорганических соединений определяет их высокие электрические характеристики. Легко видеть, что в составе этих веществ находятся органические радикалы и силоксановые группировки атомов. Такой химический состав продуктов обеспечивает высокие диэлектрические свойства. Необходимо иметь в виду, что получение рассматриваемых кремнийорганических продуктов идет через отщепление воды из молекул



Быстрота такой реакции зависит от величины радикала R: соединения с малым радикалом конденсируются очень быстро, с большим радикалом — медленно. Во всех случаях существует заметное различие между температурой, при которой начинается конденсация, и температурой, при которой она протекает полностью. Так, ортокремневая кислота начинает мгновенно конденсироваться при комнатной температуре, но должна быть прокалена для окончательного удаления следов влаги. При конденсации алкил- и арилсилантириолей и диолей желательно количественное удаление воды, чтобы обеспечить получение высококачественных диэлектриков.

В настоящее время (хотя исследования еще не закончены) совершенно ясно, что на основе кремнийорганических соединений можно получать жидкие диэлектрики, смазочные масла, смолы, слоистые диэлектрики, пластмассы, стекло-слюдяную изоляцию и т. д.

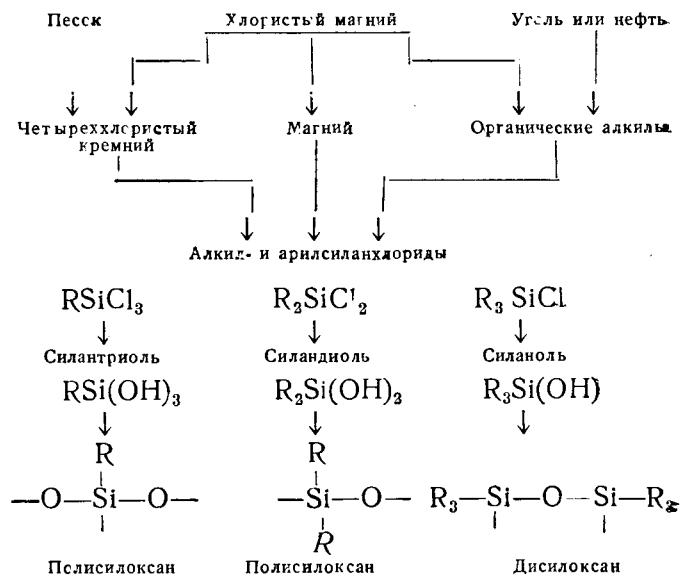
Кремнийорганические соединения представляют собой новый, может быть революционизирующий, класс веществ. Они расширяют рабочие температуры далеко за пределы термической стабильности органических продуктов и поэтому представляют исключительный интерес для электротехники.

Таблица 1

| Температура кипения $t_k, ^\circ C$ | Давление, mm рт. ст. | Уд. вес при $20^\circ C$ | Температура вспышки по Бренеку | Температура плавления, $^\circ C$ | Относительная вязкость при $20^\circ C$ |
|-------------------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---|
| 100—150 | 760 | 0,8065 | 25 | —90 | 0,65 |
| 150—200 | 760 | 0,8636 | 38 | —100 | 0,92 |
| 200—250 | 760 | 0,8700 | 86 | —100 | 2,23 |
| 55—105 | 11 | — | — | — | 1,01 |
| 105—155 | 11 | 0,895 | 107 | —78 | 2,63 |
| 155—200 | 11 | 0,918 | 132 | —72 | 18,92 |
| Выше 200 | 11 | 0,940 | 177 | —69 | 38,40 |
| 250 | 760 | 0,9964 | 114 | —80 | 5,14 |

Схема получения. Кремнийорганические высокополимерные соединения получаются из доступных в природе веществ: песка, магния, угля и нефти. Однако их синтез включает ряд ступеней химической технологии.

Принципиальная схема образования кремнийорганических продуктов может быть изображена так:



Дисилоксаны обычно жидкие или маслообразные продукты, полисилоксаны — твердые смолы или каучуко-подобные вещества.

Жидкие диэлектрики. В процессе синтеза высокополимерных кремнийорганических соединений была получена группа жидкостей, прозрачных как вода, химически инертных и стойких к действию окисления. В качестве исходных веществ для синтеза жидкостей были взяты алкилсиландиоли и алкилсиланоли. В настоящее время получены жидкости с диапазоном вязкостей, указанных в таблице 1.

Эти жидкости, не растворимые в воде, растворимы в большинстве органических растворителей и остаются жидкими при очень низких температурах. Кремнийорганические жидкости, как это видно из рис. 1 и 2, имеют необыкновенно малое изменение вязкости η при изменении температуры. Особенно интересны эти жидкости как диэлектрики; неочищенные, полученные перегонкой в вакууме, они имеют удельное объемное сопротивление при $20^\circ C$ $1,15 \cdot 10^{14} \Omega \text{ см}$, а при $80^\circ C$ $1,2 \cdot 10^{13} \Omega \text{ см}$.

Изменение тангенса угла диэлектрических потерь у них, как видно из рис. 3, также очень мало. Абсолютные значения его при изменении температуры, определенные при частоте $1,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$, у всех испытанных типов жидкостей лежат в пределах от 0,0006 до 0,004. При этом следует отметить, что $\tan \delta = 0,004$ имеет жидкость, которая не перегоняется в вакууме, а получена, как остаток от перегонки, вследствие чего она, естественно, загрязнена.

Из того же рисунка видно, что у всех жидкостей тангенс угла диэлектрических потерь практически мало зависит от температуры. Это интересное и важное свойство кремнийорганических жидкостей заслуживает особого внимания, так как эта зависимость у всех известных нам

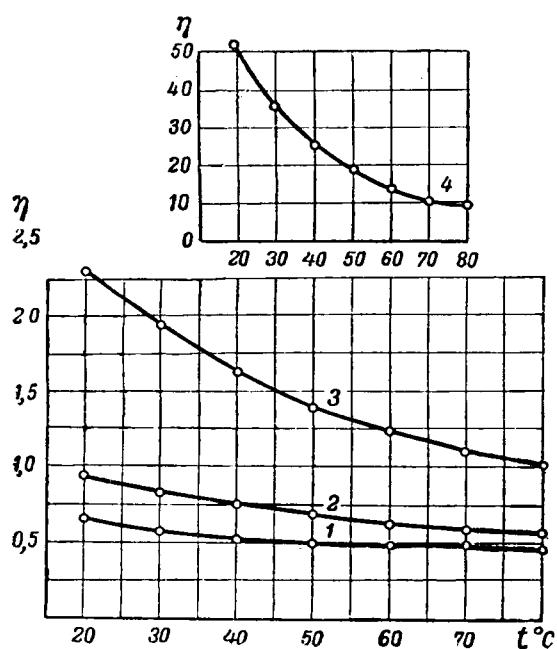


Рис. 1. Вязкость кремнийорганических жидкостей с различной точкой кипения в зависимости от температуры.

1 — температура кипения 100—150°C; 2 — 150—200°C;
3 — 200—250°C; 4 — выше 250°C.

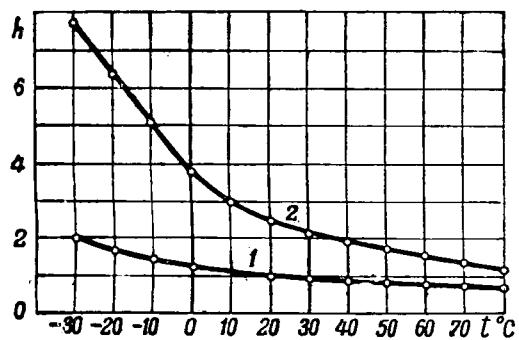


Рис. 2. Вязкость кремнийорганической жидкости в зависимости от температуры.

1 — при температуре кипения жидкости 55—105°C и 23 мм рт. ст.;
2 — при температуре кипения 105—155°C 13 мм рт. ст.

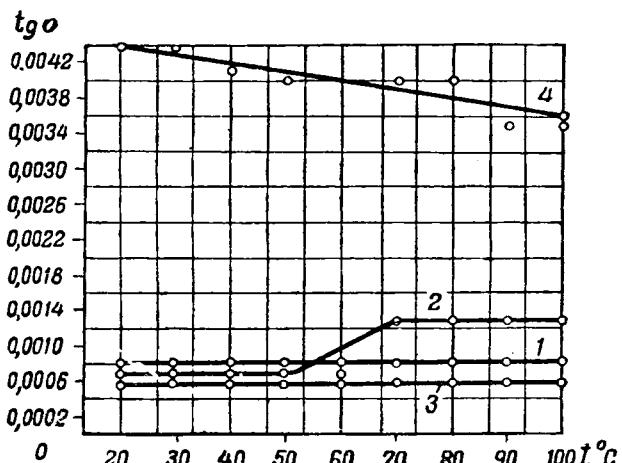


Рис. 3. $\operatorname{tg} \delta$ кремнийорганической жидкости с температурой кипения:

кривая 1 — 55—105°C; 2 — 105—155°C; 3 — 155—200°C (при 11 мм статичного давления); 4 — $\operatorname{tg} \delta$ кремнийорганического остатка с температурой кипения более 200°C.

органических жидкостей выражена достаточно резко. Диэлектрическая постоянная этих жидкостей, равная около 3,5, также практически не меняется с температурой.

Кремнийорганические жидкости-диэлектрики, безусловно, представляют большой практический интерес для электропромышленности. Они найдут себе применение в производстве радиоаппаратуры, локационной аппаратуры и кабельной технике.

Следует указать, что число жидкостей с вариацией их свойств по вязкости и температурам вспышки может быть значительно расширено, и что работы в этом направлении уже проводятся. В ВЭИ из высоковязких продуктов синтезированы кремнийорганические вазелиноподобные вещества, которые не плавятся и не текут при температурах до 210°C. Эти продукты изучаются как смазки, и они, безусловно, представляют большой интерес, как термостойкие смазочные вещества для электрических машин и других двигателей, где к смазочным веществам предъявляется высокая термостойкость.

Твердые диэлектрики. Продолжительность жизни электрического оборудования в первую очередь зависит от изоляционного материала. Последний в машинах и аппаратах должен противостоять температурным и атмосферным условиям, которые могут встретиться как при нормальной нагрузке, так и при перегрузке. Во многих случаях существенной задачей изоляции является защита оборудования от действия влаги. Органические материалы благодаря присущей им нестойкости к термическим воздействиям, в конце концов трескаются или обуглероживаются, пропуская затем влагу и проводящие элементы, что приводит к тепловому пробою.

Электрические машины и аппараты можно построить для высоких температур с применением и неорганических материалов: стекловолокна, асбеста и слюды. Однако такие машины требуют, чтобы стекловолокно и асбест были пропитаны термостойкой смолой, а слюда склеена между собой или со стеклом смолой, которая не обуглероживалась бы при действии высоких температур. В этом отношении кремнийорганические смолы, безусловно, дают возможность значительно повысить температуры нагрева машин и аппаратов.

Если обратиться к приведенным выше формулам строения кремнийорганических смол, то можно видеть, что, если последние подвергнутся действию высоких температур и кислорода воздуха, достаточно, чтобы окислить органические радикалы, то и в этом случае не произойдет обуглероживания продукта. Цепи молекул, построенные из силоксановых группировок атомов, в конечном итоге приведут к образованию не углерода, как это имеет место при органических материалах, а к SiO_2 , который в отличие от углерода, является хорошим диэлектриком. Для проверки сказанного кремнийорганическую смолу наносили на стеклянную ткань. Одновременно на другой кусок стеклоткани наносили теплостойкую глифталевую смолу. Получу-

ченные лакированные образцы стеклянной ткани помещали в муфель, где поддерживали температуру в 300° С. Образцы периодически вынимали и у них наблюдали изменение цвета. Через 1—2 часа образцы, покрытые глифталевой теплостойкой смолой, обугливались, а образцы, покрытые кремнийорганической смолой, прогретые в течение нескольких десятков часов, не только не потемнели, но стали более светлыми.

Второй вопрос, который возникает при применении электрической изоляции для работы при высоких температурах, — это получение материалов, обладающих малой зависимостью электрических свойств от температуры. При высоких температурах стеклотекстолит на обычных смолах имеет электрические свойства, не достаточные для надежной работы машин или трансформаторов. Кремнийорганические смолы имеют в этом отношении значительные преимущества.

а) *Миканит и стекломиканит*. Гибкий стекломиканит и твердый миканит изготавлялся на лаке из кремнийорганической смолы, полученной конденсацией смеси этилсилантриоля и этилсилан-

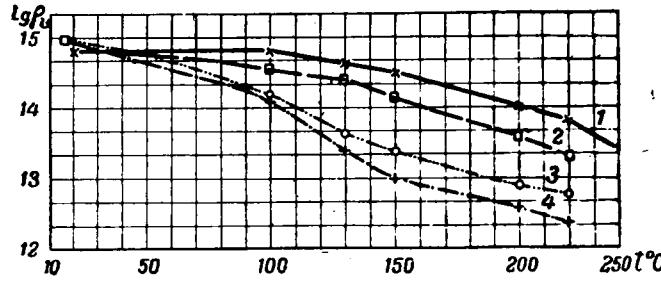


Рис. 4.

1, 2 — удельное сопротивление в зависимости от температуры стекломиканита на кремнийорганических смолах при 500 (кривая 1) и 1 000 В; 3, 4 — то же для стекломиканита на глифталевом лаке при 500 (кривая 3) и 1 000 В.

диоля. Лак обладал большой kleящей способностью к слюде и стеклу. Метод изготовления твердого миканита и стекломиканита практически ни чем не отличался от применяемых сейчас способов изготовления указанных материалов на теплостойких глифталевых лаках. Стекломиканит однослойный, на кремнийорганических смолах толщиной 0,18 мм был подвергнут испытанию, при котором было определено его удельное объемное сопротивление в зависимости от температуры в диапазоне от 20 до 250° С (рис. 4). Для сравнения был испытан и стекломиканит на теплостойком глифталевом лаке. Из рисунка видно, что удельное объемное сопротивление последнего уменьшается более резко и падает с $10^{15} \Omega \text{ см}$ при 20° С до $10^{12} \Omega \text{ см}$ при 200° С, в то время как у стекломиканита на кремнийорганических смолах удельное объемное сопротивление даже при 250° С остается более высоким, равным $5 \cdot 10^{13} \Omega \text{ см}$.

Для определения термической стабильности стекломиканита на кремнийорганических смолах он был намотан на металлические стержни. Стержни помещали в термостат, где поддерживали температуру 300—315° С. Периодически стержни вынимали из термостата, охлаждали до

комнатной температуры и измеряли их объемное сопротивление. После этого стержни помещали на 24 h в гидростат при 100% влажности, а затем измеряли сопротивление, после чего вновь помещали в термостат, из него в гидростат и так несколько раз. Суммарно образцы подвергались действию температуры 300—315° С в течение 229 h и действию влаги около 500 h. Результаты испытаний приведены на рис. 5, где кривая 1 изображает изменение удельного сопротивления сухого стекломиканита на кремнийорганических смолах после действия температуры, а кривая 3 — после температуры и влаги. Для сравнения таким же испытаниям был подвергнут стекломиканит на теплостойкой глифталевой смоле (кривые 2 и 4).

Из приведенных данных видно, что стекломиканит на кремнийорганической смоле после прогрева при 300—315° С в течение 229 h не изменил своего объемного сопротивления, в то

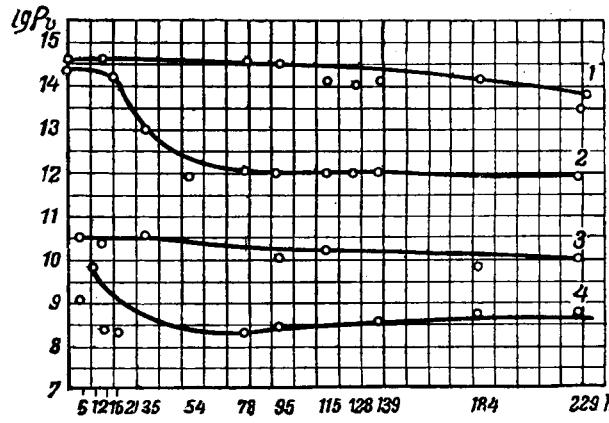


Рис. 5.

время как при глифталевой смоле после 20 h прогрева его объемное сопротивление начало резко уменьшаться и уже после 15 h упало с $5 \cdot 10^{14} \Omega \text{ см}$ до $1 \cdot 10^{12} \Omega \text{ см}$.

Эти результаты следуют объяснить тем, что kleящее вещество, глифталевая смола, при прогреве обуглероживается, благодаря чему объемное сопротивление стекломиканита даже в сухом состоянии значительно понижается. Действие влаги после прогрева также более резко сказывается у стекломакинита на глифталевой смоле. У стекломиканита на кремнийорганической смоле после 229-часового прогрева при 300—315° С и 500-часового действия 100% влажности, удельное сопротивление равнялось $5 \cdot 10^{10} \Omega \text{ см}$, в то время как при глифталевой смоле оно составляло $4 \cdot 10^8 \Omega \text{ см}$.

Твердый миканит на кремнийорганической смоле также имеет малую зависимость удельного объемного сопротивления от температуры.

б) *Стеклотекстолит*. Стеклотекстолит был изготовлен на бесщелочном стекле и кремнийорганической смоле, полученной из этилсилантриоля, которая имела скорость полимеризации при 200° С около 5 min. Режим прессования — 180° С, время выдержки 15 min на 1 mm, содержание смолы около 30%.

Стеклотекстолит на кремнийорганических смолах может представлять интерес для работы при высоких температурах, поэтому важно было определить, как у него меняются электрические свойства от температуры. Наиболее чувствительной из электрических характеристик является тангенс угла диэлектрических потерь, который у стеклотекстолита на фенольно-формальдегидных смолах резко увеличивается с температурой. Результаты измерения его и диэлектрической постоянной — ϵ при частоте $1,5 \cdot 10^6$ Hz в диапазоне температур от 20 до 200° С приведены на рис. 6. Из последнего следует, что диэлектрические потери практически очень мало изменяются от температуры при относительно невысоком абсолютном значении тангенса. Удельное же объемное сопротивление стеклотекстолита на кремнийорганической смоле высоко и оно изменяется с температурой меньше, чем у стеклотекстолита на фенольно-анилиновых смолах.

в) *Пластические массы.* Прессовочные порошки были изготовлены из кремнийорганической смолы, полученной конденсацией этилсилантириола. Для испытания были отпрессованы диски из

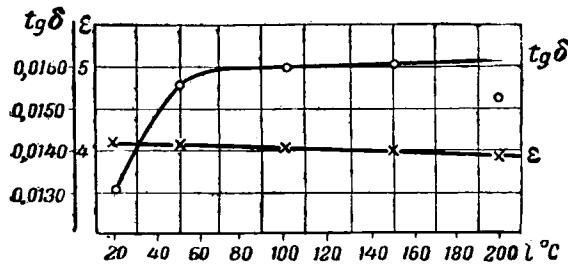


Рис. 6.

чистой смолы, из смолы с наполнителем — стеклянное волокно и из смолы с наполнителем — асбестовое волокно. Кремнийорганическая смола имела скорость полимеризации при 200° около 5 min. Состав пресспорошков с наполнителями состоял из наполнителя (стекло или асбест) 75% и кремнийорганической смолы 25%. Режим прессования — 180° С, давление 100 kg/cm². При испытании дисков определяли: удельное объемное сопротивление в зависимости от температуры и действия воды, тангенс угла диэлектрических потерь в зависимости от температуры при частоте $1,5 \cdot 10^6$ Hz и диэлектрическую постоянную. На рис. 7 приведены данные зависимости удельного объемного сопротивления от температуры для различной длительности прогрева.

Как видно из рисунка, удельное сопротивление мало меняется с температурой и остается для массы, наполненной асбестом, при 240° С — $1,1 \cdot 10^{11}$ Ω см, а для массы, наполненной стеклом, — $2,2 \cdot 10^9$ Ω см, в то время как лучшие фенольно-формальдегидные пресспорошки при 150° С имеют такие же значения. Удельное объемное сопротивление после действия 100% влажности в течение 72 h у чистой кремнийорганической смолы практически не изменилось; введение же наполнителя, асбеста и стекла ухудшает ее водостойкость.

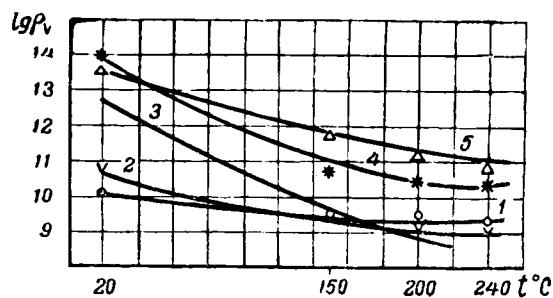


Рис. 7 Удельное сопротивление пресспорошка из кремнийорганической смолы.
1, 2, 3 — наполнитель стеклянное волокно и при прогреве 0,5 (кривая 1), 2 и 3h (кривые 2 и 3); 4, 5 — наполнитель асбест и при прогреве 3 (кривая 4), 4 и 6h.

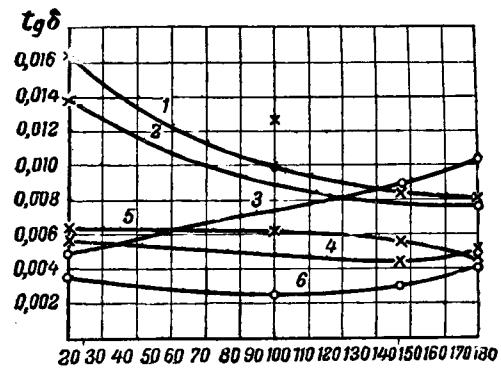


Рис. 8. tg δ пресспорошка из кремнийорганической смолы.

1, 2, 3 — наполнитель стеклянное волокно и при прогреве 0,5 (кривая 1), 2 и 3h (кривые 2 и 3); 4, 5, 6 — наполнитель асбест и при прогреве 3 (кривая 4), 4 и 6h (кривая 5 и 6).

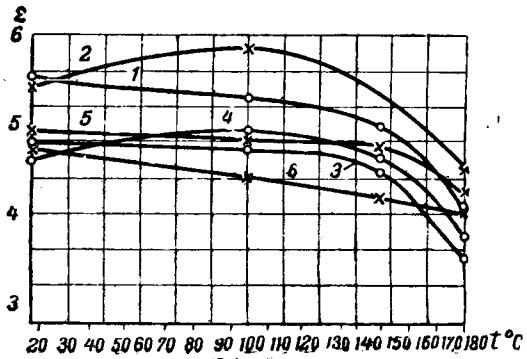


Рис. 9. Диэлектрическая постоянная пресспорошка из кремнийорганической смолы.

1, 2, 3 — наполнитель стеклянное волокно и при прогреве 0,5 (кривая 1), 2 и 3h (кривые 2 и 3); 4, 5, 6 — наполнитель асбест и при прогреве 3 (кривая 4), 4 и 6h (кривая 5 и 6).

Все прессматериалы на кремнийорганических смолах имеют очень малые диэлектрические потери (рис. 8), которые практически мало меняются в диапазоне температур от 20° до 180° С, равно как диэлектрическая постоянная (рис. 9). Это дает основание отнести их к группе высококачественных диэлектриков, представляющих большое значение для электрической изоляции.

Выводы из опытных данных. Исследования электрических свойств жидких кремнийорганических диэлектриков, слюдяной, стеклослюдяной изоляции, стеклотекстолита и пластических масс, полученных на основе кремнийорганических высокополимерных соединений, показывают, что

эти соединения пригодны для использования их в производстве теплостойкой изоляции, которую нельзя получить на основе органических полимеров.

Кремнийорганические соединения найдут себе применение не только в качестве конкурентов многих современных органических полимеров (малые диэлектрические потери), но скорее будут применяться в таких случаях, где ни один из современных электроизолирующих материалов не может быть использован и где термическая стабильность силюксанной природы новых смол не может быть превзойдена.

Исходя из этой точки зрения, кремнийорганические высокополимерные соединения должны рассматриваться как совершенно новая группа материалов, промежуточная по свойствам и применению по отношению, с одной стороны, к органическим пластикам и, с другой, — к стеклу, кварцу и керамике.

Стабильность при высоких температурах — не единственное преимущество кремнийорганических соединений. Характеристики этих соединений не были известны ранее и только сейчас начинают выясняться. В этой новой и интересной области еще не исследовано много моментов. Однако сейчас уже можно сказать, что электрическая изоляция на кремнийорганических продуктах даст возможность значительно уменьшить размеры и вес электрических машин и аппаратов без уменьшения продолжительности жизни машин и даст возможность увеличить срок службы изоляции машин с нормальной рабочей температурой. Можно также предвидеть исключительное распространение в ближайшие годы теплостойкой кремнийорганической изоляции.

* * *

Исследования по получению исходных продуктов и синтезу высокополимерных кремнийорганических соединений, — смол, лаков и других продуктов — были поставлены во Всесоюзном электротехническом институте еще за несколько лет до войны. В результате исследований была разработана теория механизма образования кремнийорганических соединений и доказана принципиальная возможность получения нового класса веществ, в которых основные цепи молекул построены из кремния и кислорода. Наши теоретические работы (кроме уже упомянутых выше) были напечатаны в 1938—1940 гг. [Л. 5].

В 1941 г. в США была опубликована первая работа, в которой подтверждалась правильность наших теоретических исследований. Наряду с этим в США были развернуты большие иссле-

довательские работы по синтезу кремнийорганических соединений и материалов на их основе [Л. 4]. Судя по опубликованным данным, в настоящее время в США исследовательскими и опытными работами в области высокополимерных кремнийорганических соединений занимаются следующие фирмы: Gen. Electric Co., Westinghouse, Dow Chemical Co, Corning Co, Dow Corning Согроп., институт в Меллоне и т. д.

Приоритет ученых СССР в создании новых синтетических кремнийорганических материалов, имеющих важное значение не только для электроизоляции, но и для других отраслей народного хозяйства, является общепризнанным. Это неоднократно отмечалось в американской научно-технической печати.

В одном из американских журналов [Л. 6] не так давно писали: «...Несмотря на то, что до настоящего времени подробности производства силиконовых смол не могут быть опубликованы, возможно, что в основном способ этот следует синтезу, разработанному несколько лет тому назад русскими научными работниками».

Из всего вышесказанного следует, что в настоящее время необходимо быстрее и смелее внедрять в практику эти новые синтетические материалы и создавать более совершенные машины, аппараты, радиоаппаратуру и другое электротехническое оборудование, поднимая технический уровень электропромышленности. Однако, для этого обязательно необходима постановка производства исходных кремнийорганических соединений.

Литература

1. К. А. Андрианов. Журнал общей химии (ЖОХ), т. VIII, вып. 13, 1938.
2. К. А. Андрианов. Промышленность органической химии, т. VI, № 4—5, 1939.
3. М. М. Котон. Журнал практической химии, вып. 9, 1939.
4. J. Rochow, W. Gilliam. Jourgr. Amer. Chem. Soc., 63, № 3, 1—41.
5. К. А. Андрианов и О. И. Грибанова. ЖОХ, т. VIII, вып. 6, 1938.
6. К. А. Андрианов и М. А. Каменская. ЖОХ, т. VIII, вып. 10, 1938.
7. К. А. Андрианов. Новая серия 28, № 1, 1940.
8. К. А. Андрианов. Исследования в области кремнийорганических смол и пленкообразующих веществ. Докторская диссертация. Москов. хим.-технол. институт им. Менделеева, 1940.
9. К. А. Андрианов. Электрическая изоляция. Сборник материалов, вып. 2. Госэнергоиздат, 1938.
10. К. А. Андрианов. Изоляционные материалы (органические диэлектрики). Госэнергоиздат, 1940.
11. К. А. Андрианов. Бюллетень Химического общества им. Менделеева, Изд. Академии наук СССР, № 8, 1940.
12. Chem. Met. Eng. v. 51, № 8, 1944.



Эффект высокой интенсивности в вольтовой дуге постоянного тока между угольными электродами

Доктор техн. наук, проф. Н. А. КАРЯКИН

Всесоюзный электротехнический институт

1. Роль состава и геометрических параметров углей. Состав оболочки. Оболочка положительных углей высокой интенсивности состоит почти полностью из углерода. Примеси составляют лишь около 1% и являются неизбежными спутниками углеродистых материалов, применяемых в электроугольном производстве. Состав оболочки может различаться по виду углеродистых материалов: графит, кокс, сажа или различные комбинации их.

Полученные нами сведения о развитии и сущности эффекта высокой интенсивности позволяют объяснить роль состава оболочки положительных углей в достижении интересующих нас свойств дугового разряда.

Замена одного вида углерода другим в составе оболочки приводит к изменению ее электрической проводимости и одновременно к изменению распределения тока, проходящего через оболочку и кратер, следовательно, окажет влияние на различные свойства разряда. Например, применяя при одинаковом фитиле оболочку с увеличенной проводимостью (скажем, графитовую вместо сажевой), мы должны получить замедленное выгорание кратера. Объясняется это тем, что при хорошо проводящей оболочке уменьшается плотность тока в кратере и затрачиваемая в нем мощность. Снижение выделяемой на аноде мощности приведет к уменьшению расхода анода, благодаря чему в его общем расходе увеличится доля сгорания оболочки и уменьшится доля ее испарения. При этих условиях уменьшится толщина конца оболочки, а следовательно, выгорание кратера будет затруднено. Общий ход развития эффекта высокой интенсивности в этом случае получится замедленным.

Для иллюстрации роли материала оболочки на рис. 1 даны характеристические кривые дуги с углами, имеющими графитовую оболочку. Во всем остальном эти угли были одинаковы с углами, имеющими сажевую оболочку. Характеристические кривые дуги с сажевыми углами при оди-

Выясняется влияние состава и геометрических параметров углей на ход развития эффекта высокой интенсивности в вольтовой дуге постоянного тока. Определяются параметры равноярких углей и приведены экспериментальные данные о равноярких дугах. Понятие о равноярких дугах применяется для решения некоторых практических вопросов дуги высокой интенсивности. Предыдущие статьи автора по этой проблеме напечатаны в журнале «Электротехничесво» № 8 и 11, 1945 г., и № 3, 1946 г.

Факт высокой интенсивности начинает развиваться при $i = 120$ А, а при углях с сажевой оболочкой при $i = 80$ А. Выгорание кратера до предельной глубины и развитие эффекта высокой интенсивности продолжаются до силы тока дуги в 200 А, тогда как при углях с сажевой оболочкой развитие указанного эффекта заканчивалось при $i = 180$ А.

На практике к оболочке угля предъявляется и ряд других требований, как-то: минимум тре-

наковых условиях их работы в дуговой лампе были даны ранее (рис. 2 [Л. 1]).

Из сопоставления указанных характеристических кривых можно видеть, что при углях с графитовой оболочкой эф-

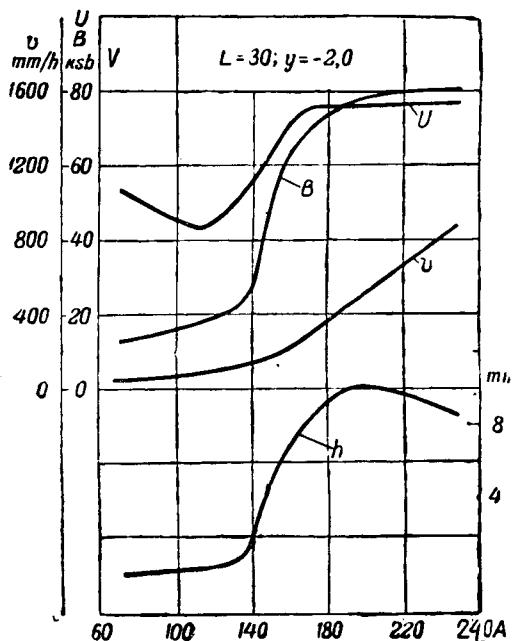


Рис. 1. Характеристические кривые дуги углей с графитовой оболочкой.
 V — вольтамперная характеристика; B — стильбамперная характеристика; h — глубина кратера; v — расход анода.

щин, достаточная механическая прочность, отсутствие обламываний в момент включения и при горении дуги и др. Одновременное удовлетворение всех основных требований и будет определять оптимальный состав оболочки в каждом конкретном случае.

Состав фитиля. Сравнивая сплошные и пунктирные характеристические кривые дуги (рис. 3) [Л. 2] мы видели, что угли с 10-процентным содержанием редких земель в фитиле обеспечивают более раннее, но более медленное развитие эффекта высокой интенсивности, чем угли с 70% содержанием редких земель. Прежде чем перейти к объяснению этой зависимости, мы должны заметить, что она не является общей.

На рис. 2 даны характеристические кривые дуги с 16-мм углами двух вариантов, имеющими фитили одинакового диаметра, но с различным содержанием редких земель. В углях одного варианта содержание редких земель в фитиле составляло 63% (пунктирные кривые на рис. 2), а другого 22% (сплошные кривые на рис. 2). Характеристические кривые были сняты при следующих условиях работы углей в дуговой лампе: высота расположения катода $y = -5,5$ мм, длина дуги $L = 20$ мм; угол наклона отрицательного угла к горизонту $\beta = 20^\circ$ и вылет положительного угла из радиатора лампы $s = 30$ мм.

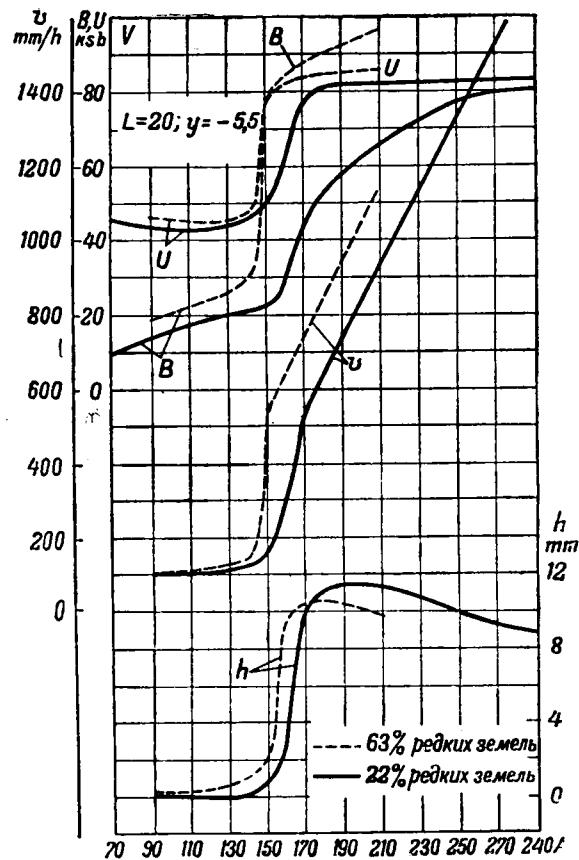


Рис. 2. Характеристические кривые дуги углей с различным содержанием редких земель при низком расположении катода и малой длине дуги.

U — вольтамперная характеристика; В — стильтамперная; h — глубина кратера; σ — расход анода.

Как видно из кривых рис. 2, в этом случае применение углей с пониженным содержанием редких земель в фитиле обусловило и более позднее и более медленное развитие эффекта высокой интенсивности, что было вызвано низким расположением катода и малой длиной дуги.

Для объяснения обнаруженной зависимости, кроме известных нам данных о развитии и сущности явления эффекта высокой интенсивности, нужно принять во внимание следующий наблюдаемый при экспериментах факт: в случаях одинакового и достаточно высокого расположения катода (например, при $y = -2$ мм) отрицательное пламя дуги при углях с повышенным содержанием редких земель располагается более низко, чем при углях с малым содержанием редких земель. Очевидно, это связано с тем, что при углях с повышенным содержанием редких земель проводимость нижних слоев пламени у анода получается большей (благодаря увеличенному содержанию редких земель в парах у анода), и отрицательное пламя вследствие этого встречается с анодом в более низком месте. Таким образом, увеличенное содержание редких земель в фитиле должно производить действие, адекватное действию снижения расположения катода, т. е. замедлять начало развития эффекта высокой интенсивности. При дальнейшем повышении силы тока дуги после образования кратера повышенная концентрация редких земель в парах у анода обеспечивает лучшие условия для отшнурования разряда. Благодаря этому эффект высокой интенсивности развивается быстрее при углях с повышенным содержанием редких земель в фитиле.

Когда катод расположен ниже (например, при $y = -5,5$ мм), а длина дуги уменьшена, тогда и при малых силах тока отрицательное пламя достигает краев анода благодаря своему давлению на анод. В таких случаях большее или меньшее содержание редких земель в фитиле не играет вначале какой-либо роли, поскольку оно не может существенно изменить расположение отрицательного пламени дуги. При увеличении силы тока дуги, когда расход анода возрастает, условия для отшнурования разряда бывают лучше при углях с повышенным содержанием редких земель в фитиле, и развитие эффекта высокой интенсивности в этом случае идет быстрее.

В фитиле современных положительных углей высокой интенсивности не применяются какие-либо иные вещества, кроме редких земель и лантана, содержащих небольшое количество примесей в виде кремния, железа, алюминия, бора, тория, магния, кальция. В электроугольном производстве эти вещества известны под общим названием церия.

Относительно вида редких земель и лантана, используемых при производстве углей, литературные сведения несколько разноречивы. Можно встретить указания, что церий в составе фитиля положительных углей применяется в виде фтористых солей. В отдельных работах доказывается преимущество окислов перед фторидами. На-

конец, встречаются указания о том, что церий используется в виде смеси фторидов и окислов.

Температура плавления фторидов равна 1 320°, а окислов церия 2 600°. Наличие у положительного угля фитиля с меньшей летучестью при окислах церия должно привести к запаздыванию выгорания кратера, а следовательно, к запаздыванию развития эффекта высокой интенсивности. Таким образом, замена фторидов редких земель окислами в составе фитиля окажет действие, аналогичное действию снижения расположения катода или действию уменьшения длины дуги. Запаздывание начала развития эффекта высокой интенсивности может переместить фазу его развития в область больших значений силы тока дуги, при которых спокойное горение дуги невозможно.

Например, применение окислов редких земель в фитиле углей типа 16—150 смешает начало развития эффекта высокой интенсивности в область тока дуги $i > 150$ А. Достаточная глубина кратера получается при $i = 200$ А, когда световой, звуковой и электрический режимы горения дуги получаются неудовлетворительными. Отсюда, как будто, нужно сделать заключение о том, что применение окислов можно рекомендовать лишь для углей, работающих с сравнительно большой плотностью тока.

Однако необходимо учесть еще одно свойство фитиля с окислами редких земель. Оно состоит в том, что фитиль с окислами не обладает спокойным и равномерным испарением. Испарение фитиля при горении дуги в этом случае происходит с поверхности дна кратера, не распространяясь по фитилю вглубь; при этом от фитиля отрываются частицы, не успевающие испаряться внутри кратера и «высыпающиеся» в виде искр в пламя дуги. Таким образом применение редких земель в виде одних окислов рекомендовать нельзя.

Резюмируя изложенное, можно сказать, что добавление окислов к фторидам редких земель в составе фитиля положительных углей можно рассматривать как одно из средств для регулирования хода развития эффекта высокой интенсивности. Технической целью применения этого средства, как и других аналогичных средств (высота расположения и угол наклона катода, длина дуги, состав оболочки и др.), должно являться достижение совпадения нормального тока дуги с ее номинальным (рабочим) значением при данных углях. Целесообразность использования окислов в смеси с фторидами в каждом конкретном случае может быть определена путем исследования хода развития эффекта высокой интенсивности.

Диаметр фитиля и толщина оболочки. Можно с уверенностью заявить, что в современной литературе по дуге высокой интенсивности и в практике электроугольного дела значение толщины стенки оболочки угля не оценивается в должной мере. При оценке параметров углей принимают во внимание или величину диаметра фитиля или величину отношения диаметра фитиля к диамет-

ру оболочки $\frac{d_\phi}{d}$. Однако ранее мы показали [Л. I], что величина отношения $\frac{d_\phi}{d}$ не имеет самостоятельного значения для развития эффекта высокой интенсивности.

В свете полученных нами данных об этом эффекте следует указать на самостоятельное и важное значение толщины стенки оболочки положительного угля. Например, известное в литературе необъясняемое и считающееся неизбежным свойство толстых углей давать более высокую яркость по сравнению с яркостью тонких углей, работающих при одинаковой расчетной плотности тока, в действительности зависит от толщины стенки оболочек углей и не является обязательным в общем случае. Мы можем сказать, что толстые угли, имеющие одинаковый состав с тонкими углями и работающие при одинаковой плотности тока, могут иметь более высокую яркость кратера лишь в случае, если толщина стенки их оболочки будет больше.

Вопрос о сравнительных значениях яркости кратера углей разных диаметров будет подробнее рассмотрен ниже.

Если в углях заданного диаметра уменьшить диаметр фитиля, то увеличится толщина стенки оболочки $t = \frac{d - d_\phi}{2}$. Увеличение толщины стенки оболочки облегчает выгорание кратера, следовательно, при уменьшении диаметра фитиля развитие эффекта высокой интенсивности должно начинаться раньше. Второе обстоятельство будет заключаться в том, что при фитилях

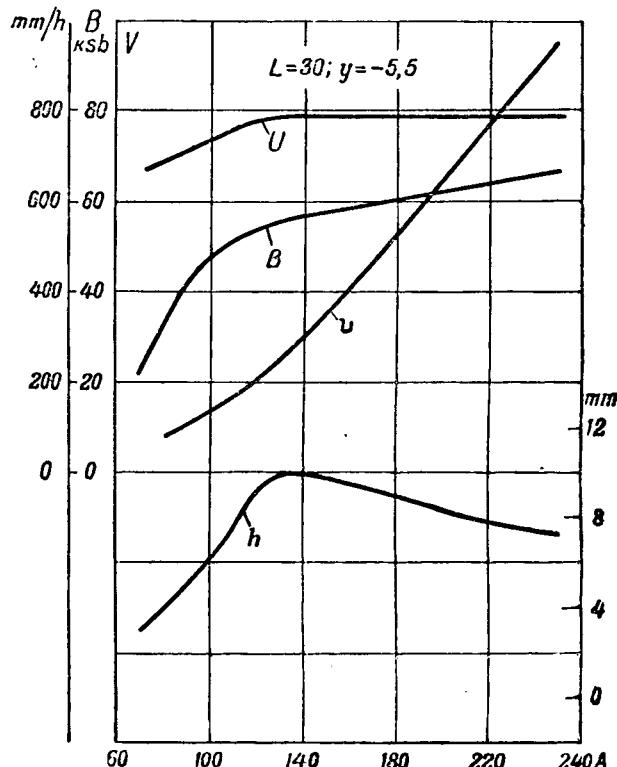


Рис. 3. Характеристические кривые дуги углей с тонким фитилем.
 U — вольт-амперная характеристика; B — стильбамперная; h — глубина кратера; v — расход анода.

единакового состава уменьшенного диаметра концентрация редких земель в парах у анода будет меньше. Вследствие этого проявится действие, аналогичное действию от уменьшения содержания редких земель в составе фитиля, а именно: 1) развитие эффекта высокой интенсивности начнется раньше по причине подъема отрицательного пламени и 2) уровень полного развития эффекта высокой интенсивности будет ниже благодаря худшему отшнурованию разряда в менее проводящем кратере.

На рис. 3 даны характеристические кривые дуги с 16-мм углами, имеющими фитиль диаметром в 5 мм. Состав этих углей и условия их работы в дуговой лампе были одинаковы с составом и условиями работы 16-мм углей с фитилем диаметром в 7 мм, характеристические кривые которых были приведены ранее (рис. 3) [Л. 1]. Согласно кривой $h(i)$ рис. 3 при углях с 5-мм фитилем выгорал кратер глубиной в 3 мм при минимальном токе дуги $i = 70$ А. В случае углей с 7-мм фитилем при такой силе тока дуги кратер не выгорал. Предельная глубина кратера у углей с тонким фитилем достигалась при $i = 130$ А вместо $i = 170$ А у углей с 7-мм фитилем. Пониженные значения напряжения дуги, расхода анода и яркости кратера при $i = 180$ А у дуги с углами, имеющими 5-мм фитиль, свидетельствуют о меньшем уровне развития эффекта высокой интенсивности в этом случае.

2. Равнояркие дуги высокой интенсивности. *О принципиальной возможности получения равноярких дуг.* Полученные нами сведения о сущности эффекта высокой интенсивности позволяют правильно решить вопрос о равноярких дугах высокой интенсивности.

Исходя из данного определения сущности эффекта высокой интенсивности [Л. 2], следует сказать, что получение одинаковой яркости кратера при углях разных диаметров возможно, если при всех сравниваемых углях соблюдаются строго одинаковыми: 1) фактическая плотность тока разряда в парах, заключенных в кратере; 2) визуальная испускательная способность смеси этих паров; 3) толщина излучающего слоя паров. Нетрудно, однако, убедиться в том, что получение перечисленных величин строго одинаковыми при углях разного диаметра является принципиально невозможным по ряду обстоятельств, из которых отметим как основные два следующие.

Получение одинаковой толщины излучающего слоя паров у равноярких дуг требует наличия у них одинаковой глубины кратера. При одинаковой глубине кратера его объем при углях разного диаметра будет различен. При этих условиях вопрос об одинаковой визуальной испускательной способности смеси паров угля, заключенных в кратере, усложняется и требует уточнения.

Действительно, мы не можем говорить о неизменном составе паров в любой точке объема данного кратера, поскольку редкие земли испаряются только из фитиля на дне кратера, тогда

как углерод при испарении оболочки поступает в кратер и с боковых его стенок. Поэтому концентрация редких земель в составе паров будет убывать по мере подъема их со дна кратера к его отверстию.

Далее, у углей разного диаметра пары фитиля, распределяясь по всему объему кратера, будут иметь разную концентрацию в зависимости от величины объема кратера углей данного диаметра.

При этих условиях нет возможности говорить об одинаковой визуальной испускательной способности паров в любой точке данного кратера, а тем более — в любых или хотя бы соответственных точках кратеров углей различных диаметров.

Желая упростить задачу, мы примем во внимание, что в равноярких дугах нас интересует яркость центральной части кратера. Представим себе, что яркость кратера обусловливается свечением только редких земель. Представим также, что их поверхностная концентрация, изменяясь в различных сечениях кратера плоскостями, перпендикулярными к оси угля, остается одинаковой для соответственных сечений различных кратеров равноярких дуг данной серии. В таком случае мы могли бы считать визуальную испускательную способность паров угля в кратере условно одинаковой для углей любого диаметра.

Что касается поверхностной концентрации редких земель, одинаковой для соответственных сечений кратеров плоскостями, перпендикулярными оси угля, то получение ее является возможным при углях разного диаметра. Для этого необходимо, чтобы положительные угли разного диаметра имели одинаковыми: состав, отноше-

ние $\frac{d\phi}{d}$, глубину кратера и расход угля.

Однако ранее нами было показано, что одним из основных условий для выгорания кратера является толщина стенки оболочки угля. Понятно, что эта толщина при углях разного диаметра, имеющих равное отношение $\frac{d\phi}{d}$, не может быть одинаковой. Следовательно, угли разного диаметра, имеющие одинаковыми состав и величину отношения $\frac{d\phi}{d}$, благодаря неравной толщине стенки оболочки не могут иметь при равной плотности тока одинаковую глубину кратера. В силу этого яркость их кратера должна быть различна.

Вторым из указанных обстоятельств является давление отрицательного пламени на анод. Это давление зависит от силы тока дуги, а следовательно, будет неодинаково при углях разного диаметра, работающих при разной силе тока. Правда, подбирая оптимальные условия (высота расположения катода, длина дуги и пр.) для горения углей каждого размера, можно в значительной степени уравнять с этой точки зрения условия развития эффекта высокой интенсивности при разных углях.

Исходя из сущности эффекта высокой интенсивности, кратер дуги следует рассматривать как трубку, наполненную парами положительного угля, через которую проходит электрический ток. Учитывая, что яркость кратера-трубки определяется тремя указанными выше факторами, можно создать приблизительно одинаковые условия для получения при углях разного диаметра практически одинаковых значений яркости центральной части кратера.

Параметры равноярких углей, принадлежащих одной серии. Для получения одинаковых значений яркости кратера углей разного диаметра при соответственных значениях тока дуги одним из основных условий следует считать наличие одинаковой толщины стенки оболочки у всех сравниваемых положительных углей. Соблюдение этого условия при одинаковом составе углей обеспечивает получение у них одинаковой глубины кратера. Из этого условия легко определяются геометрические параметры любого угля, принадлежащего к данной серии равноярких углей, поскольку всегда можно написать:

$$d = d_\phi + 2t. \quad (1)$$

У углей разного диаметра с одинаковой толщиной стенки оболочки отношение $\frac{d_\phi}{d}$ будет различно, следовательно, и при одинаковом составе фитиля у таких углей нельзя получить одинаковых концентраций паров редких земель на соответственных поверхностях кратера. Указанное различие условий для свечения кратера можно значительно уменьшить, если при углях разного диаметра получить одинаковую объемную концентрацию паров редких земель, заключенных в кратере.

Связь между объемной концентрацией редких земель в кратере и их содержанием в составе фитиля может быть выражена, считая расход угля одинаковым, в виде:

$$C = \frac{\Sigma R \cdot d^2 \phi}{Q}, \quad (2)$$

где ΣR — содержание редких земель и лантана в составе фитиля в долях всего состава фитиля, принятого за единицу;

Q — объем кратера (его можно приблизительно определить, считая диаметр кратера равным диаметру угля).

Из условий получения одинаковых значений объемной концентрации редких земель с помощью уравнения (2) можно определить необходимое содержание редких земель в составе фитиля любого угля данной серии равноярких углей. Заметим, что опыт показывает на возможность некоторого отклонения от этой постоянной величины без большого нарушения равенства яркости кратера. Это не может вызывать удивления, так как вместе с редкими землями в кратере светится и углерод.

Указывалось выше, что равнояркие дуги должны иметь одинаковой фактической плотность

тока разряда в парах, заключенных в кратере. При одинаковой толщине стенки одинаковых по составу оболочек, при равной объемной концентрации редких земель в кратере и при оптимальных условиях работы углей разного диаметра в дуговой лампе фактическая плотность тока должна быть приблизительно пропорциональна величинам

$$k = \frac{i}{d^2}. \quad (3)$$

Экспериментальные данные о равноярких дугах. С целью проверки правильности изложенных соображений о равноярких дугах высокой интенсивности были рассчитаны и изготовлены положительные угли двух типов диаметром в 11 и 18 мм. Толщина оболочки углей была принята равной 3,25 мм, диаметр фитиля получился соответственно равным 4,5 и 11,5 мм. Содержание редких земель в фитилях 18-мм углей было принято равным 22%, а для 11-мм углей было получено расчетом значение, равное 54%. Оболочки углей были одинаковы по составу и технологии.

При указанных опытных углях были сняты характеристические кривые дуги. Условия работы углей каждого типа в дуговой лампе были близки к оптимальным. 11-мм угли работали в дуговой лампе с углом наклона отрицательного угла к горизонту $\beta = 75^\circ$, 18-мм при $\beta = 20^\circ$.

Можно сказать, что если мы правы в вопросе о равноярких дугах высокой интенсивности, то соответствующие кривые яркости кратера и расхода анода при обоих сравниваемых углях, построенные в зависимости от величины отношения $\frac{i}{d^2}$, будут близки к совпадению друг с другом. Другими словами, у равноярких дуг, работающих с углями разного диаметра, яркость кратера должна быть одинаковой, если сила тока будет изменяться прямо пропорционально квадрату диаметра положительного угля.

На рис. 4 даны кривые $B\left(\frac{i}{d^2}\right)$ и $v\left(\frac{i}{d^2}\right)$ дуг с опытными углами диаметром в 11 и 18 мм. Эти кривые обнаруживают практически достаточное совпадение каждой пары кривых друг с другом, подтверждая тем самым правильность наших соображений о равноярких дугах высокой интенсивности.

В работах некоторых авторов [Л. 3, 4] приводятся данные о том, что яркость углей высокой интенсивности одинакового состава разного диаметра остается постоянной, если сила тока дуги изменяется прямо пропорционально диаметру положительного угля. Как следствие этого кратер дуги принимается за черный излучатель.

Очевидно, если эти авторы правы, то должны быть близки к совпадению друг с другом аналогичные кривые дуги, построенные в зависимости от величин отношения $\frac{i}{d}$. Однако такие построения, произведенные для наших углей, показали полное несовпадение кривых, что свиде-

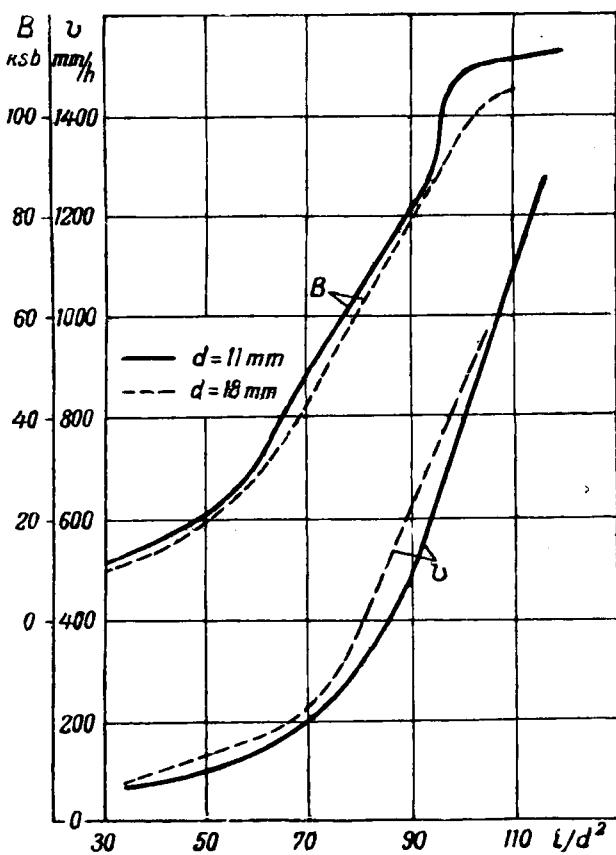


Рис. 4.

тельствует об ошибочности этой закономерности ($\frac{i}{d}$).

В качестве иллюстрации к нашим соображениям о равноярких дугах высокой интенсивности в таблице приведены значения яркости кратера для двух серий равноярких дуг при силах тока, соответствующих двум точкам характеристических кривых дуг [1] начало развития эффекта высокой интенсивности и 2) номинальный режим дуги]. Все угли работали в одной и той же дуговой лампе с углом наклона оси отрицательного угла к горизонту $\beta = 25^\circ$.

Таблица позволяет сделать общее заключение о том, что для серии углей с толщиной стенки оболочек $t = 2$ мм развитие эффекта высокой интенсивности начинается при токе дуги, соответствующем расчетной плотности тока около 50 A/cm^2 . У другой серии с толщиной $t = 1,5$ мм, начало развития эффекта высокой интенсивности наблюдается при расчетной плотности тока около 75 A/cm^2 . Угли первой серии дают яркость кратера около 30 ksb при расчетной плотности тока в 80 A/cm^2 , тогда как угли второй серии дают приблизительно такую же яркость при расчетной плотности тока в 100 A/cm^2 . Хорошее совпадение величин расчетной плотности тока и яркости кратера для всех трех углей каждой серии подтверждает правильность наших воззрений на равнояркие дуги.

Выяснение некоторых вопросов с помощью понятия о равноярких дугах. Наши сведения о равноярких дугах значительно упрощают задачи

Данные равноярких углей высокой интенсивности

| Диаметр положительного угла, мм | Диаметр фитиля, мм | Толщина стенки оболочки, мм | Начало развития эффекта высокой интенсивности | | Данные номинального режима работы дуги | | |
|---------------------------------|--------------------|-----------------------------|---|---|--|---|------------------------------------|
| | | | ток дуги, А | расчетная плотность тока, A/cm^2 | ток дуги, А | расчетная плотность тока, A/cm^2 | яркость центральной зоны края, ksb |
| 8 | 4 | 2 | 25 | 50 | 40 | 80 | 29 |
| 7 | 3 | 2 | 20 | 52 | 31 | 80 | 28 |
| 6 | 2 | 2 | 15 | 53 | 22,5 | 80 | 28,5 |
| 7 | 4 | 1,5 | 30 | 75 | 38 | 100 | 30 |
| 6 | 3 | 1,5 | 20 | 71 | 28 | 100 | 31 |
| 5 | 2 | 1,5 | 15 | 73 | 20 | 100 | 30 |

создания наиболее ярких углей разных типов. Найдя экспериментально оптимальные параметры углей какого-либо одного из типов, входящих в определенную серию равноярких углей, можно определить расчетом параметры всех остальных типов углей, принадлежащих той же серии.

Соображения о равноярких дугах позволяют правильно оценить параметры существующих углей разных типов и выяснить возможности их улучшения. Например, раньше мы показали [Л. 5], что яркость кратера углей типа 11-75 известных марок (36—40 ksb) значительно ниже яркости кратера углей типа 16-150 (60—66 ksb). Выясняя теперь причины этого обстоятельства, одновременно покажем, что литературные данные, приписывающие без объяснений повышенную яркость углям большего диаметра, являются для общего случая неправильными.

Существующие угли типа 16-150 можно отнести к углям равноярких серий с толщиной стенки оболочек в 4—4,25 мм, расчетная плотность тока у которых при номинальной силе тока дуги составляет 75 A/cm^2 . Угли типа 11-75, имеющие отношение $\frac{d_f}{d} = 0,5$, следует отнести к другой серии равноярких углей с толщиной стенки оболочек около 2,7 мм. Работая при почти одинаковой с углями типа 16-150 расчетной плотности тока в 79 A/cm^2 , угли типа 11-75, естественно, не могут обладать одинаковой яркостью кратера, поскольку условия для выгорания кратера у них затруднены. Возможность улучшения углей типа 11-75 существующих марок ограничивается допустимым увеличением толщины стенки их оболочки. Согласно сказанному выше, яркость кратера 11-мм углей типа 11-75 есть и должна быть ниже яркости кратера 16-мм углей типа 16-150. Было бы, однако, неправильно считать яркость кратера 11-мм углей вообще ниже яркости кратера 16-мм.

Если взять угли типа 16-200, то соответствующая оптимальная серия равноярких углей имеет толщину стенки оболочек углей около 3,5 мм. 11-мм угли этой серии должны, следовательно, иметь диаметр фитиля 4 мм. При таком фитиле оказывается возможным получить необходимую объемную концентрацию редких земель в кратере и удовлетворительное распределение яркости вдоль диаметра кратера. Из равенства

расчетной плотности тока обоих углей определяется сила тока нормального режима дуги с 11-тт углами, равная около 100 А, т. е. получаем угли типа 11-100. Таким образом выходит, что 16-тт угли типа 16-200 и 11-тт типа 11-100 будут иметь одинаковую яркость центральной части кратера при одинаковой расчетной плотности тока.

Опыт подтверждает правильность этих соображений.

Понятие о равноярких дугах оказывается весьма полезным при решении задачи о предельных возможностях в отношении яркости кратера дуги высокой интенсивности.

При переходе от углей одной равнояркой серии, работающих при меньшей плотности тока и обладающих меньшей яркостью кратера, к углам другой равнояркой серии с большей плотностью тока и большей яркостью, мы будем иметь уменьшение толщины стенки оболочек. Следовательно, существует некоторая минимально необходимая толщина стенки оболочек, которая может обеспечить выгорание и сохранение правильной формы кратера. Эта толщина будет не очень мала, так как оболочка на краю кратера выгорает изнутри и обгорает снаружи. Далее, практическим пределом может явиться и расход анода, увеличивающийся вместе с ростом плотности тока и мощности, затрачиваемой в кратере.

Из изложенного ясно, что, принимая за характеристику серии равноярких углей расчетную плотность тока, можно при одном значении этой характеристики иметь множество серий равноярких углей. Среди этого множества серий нас практически интересует лишь одна серия, которую мы назовем *оптимальной* серией равноярких углей. Можно определить оптимальную серию равноярких углей как такую серию, у углей которой при выбранной плотности тока два остальных показателя (толщина стенки оболочек и объемная концентрация редких земель в кратере) выбраны так, чтобы обеспечить наибольшую возможную при данной расчетной плотности тока яркость кратера.

Учитывая полученные данные из исследования развития эффекта высокой интенсивности, можно сказать, что угли оптимальной равнояркой серии должны удовлетворять следующим условиям: 1) номинальная (рабочая) сила тока дуги должна совпадать с ее нормальной силой тока; 2) уровень развития эффекта высокой интенсивности должен быть самым высоким по сравнению с аналогичными уровнями развития при любых других углях, работающих с такой же расчетной плотностью тока. Варьируя состав, геометрические параметры и условия работы углей в дуговой лампе, можно добиться удовлетворения одновременно обоим указанным требованиям.

Характеризуя оптимальные серии равноярких углей расчетной плотностью тока рабочего режима дуги, будем иметь различную яркость кратера углей разных оптимальных серий. Яркость будет увеличиваться вместе с ростом расчетной

плотности тока. Наш опыт работы с дугой высокой интенсивности показал возможность получения простого эмпирического выражения для яркости кратера углей, принадлежащих к различным оптимальным сериям. Если выражать яркость центральной части кратера в ksb , а расчетную плотность тока углей в A/cm^2 , то указанная яркость оказывается численно приблизительно равна расчетной плотности тока:

$$B = \frac{i}{\pi r^2}. \quad (4)$$

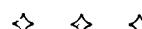
Согласно соотношению (4), угли типа 16-150 оптимальной серии равноярких углей, как имеющие расчетную плотность тока рабочего режима дуги 75 A/cm^2 , должны давать яркость кратера в 75 ksb . Угли существующих марок этого типа имеют яркость кратера в $60-66 \text{ ksb}$. Это снижение яркости кратера углей существующих марок обусловлено, главным образом, неправильной толщиной стенки и неправильным составом оболочки углей.

Толщина стенки оболочки углей типа 11-75, обладающих яркостью кратера в $36-40 \text{ ksb}$, не может быть сделана равной толщине стенки оболочек равноярких углей оптимальной серии с расчетной плотностью тока в 75 A/cm^2 . В силу этого обстоятельства у углей типа 11-75 расчетная плотность тока рабочего режима дуги (79 A/cm^2) получается значительно меньше, чем расчетная плотность тока (около $\sim 100 \text{ A/cm}^2$) той оптимальной серии равноярких углей, к которой они могли бы при правильном их составе принадлежать в соответствии с сравнительно малой толщиной стенки их оболочки. Таким образом, угли типа 11-75 при их номинальной силе тока являются по существу недогруженными током и, следовательно, должны обладать пониженной яркостью кратера. Повышение яркости кратера углей типа 11-75 до 75 ksb невозможно.

Аналогичное соображение относится к углам всех типов меньшей мощности (8-50, 6-30 и др.). Поэтому угли типов малой мощности при номинальном значении силы тока дуги будут обладать яркостью кратера меньшей, чем определяемая соотношением (4). Для определения предельно возможных величин яркости данного типа углей малой мощности при номинальной силе тока дуги (например, для оценки степени совершенства углей разных марок заданного типа) необходимо иметь стилембамперные кривые дуги с углами одного из типов той оптимальной серии равноярких углей, толщина стенки оболочек которых одинакова с таковой рассматриваемых углей малой мощности.

Литература

1. Н. А. Каракин. Электричество, № 11, 1945.
2. Н. А. Каракин. Электричество, № 3, 1946.
3. W. Finkelnburg. Zeit. f. Phys., Bd 113, № 9-10, 1939.
4. F. Patzel. Kinetchnik, № 7, 1940.
5. Н. А. Каракин. Электричество, № 8, 1945.



Термические воздействия токов молний

Кандидат техн. наук. В. С. КОМЕЛЬКОВ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Тепло, выделяемое молнией в месте удара. Термо, выделяемое в месте поражения, определяется энергией, выделенной в металле в результате прохождения через него тока (джоулево тепло) и бомбардировки металла электронами и ионами, приходящими из канала молний.

Чтобы уяснить значение джоулевых потерь в тепловом балансе, необходимо оценить размеры канала и плотность тока в нем.

По фотографическим измерениям [Л. 1] диаметр канала молний изменяется от 3 до 40 см. Эти данные преувеличиваются, однако, размеры той области внутри канала, обладающей наибольшей ионизацией, через которую протекает основная доля тока. Мы не располагаем какими-либо исследованиями, позволяющими точно определить размеры этой области, и вынуждены ограничиться приближенной ее оценкой по тем следам, которые оставляет мощный искровой разряд, близкий по своим параметрам к прямому удару, на полированной поверхности металла.

По оплавлению на металле Беллаши нашел [Л. 2], что плотность тока в канале искрового разряда с амплитудой тока 140 кА достигает 800 A/mm^2 . Расплавление проводника волнами тока той же продолжительности наступает при плотностях тока, в 50 раз больших (40 kA/mm^2). Соответственно и энергия, выделяемая за счет джоулевых потерь, будет, естественно, в 2500 раз больше, чем это может иметь место при максимальных плотностях тока в канале молний.

Предположения о каком-либо сужении канала молний в точке касания ее с металлом мало вероятны. Следует подчеркнуть, что эксперимент [Л. 3] также не обнаруживает какой-либо заметной зависимости между количеством расплавленного металла и $\int_0^\infty i^2 dt$, которая должна была бы существовать, если бы джоулево тепло имело существенное значение.

Попытаемся, далее, оценить тепло, выделяемое молнией в месте контакта в дуговом режиме.

Степень необходимости грозозащиты целого класса сооружений: металлических газгольдеров, нефтеперегонных установок с наружной металлической аппаратурой, нефтехранилищ и т. п., определяется, главным образом, возможностью прожигания молнией металлических поверхностей или прогревом внутренних стенок выше определенной температуры, критической для того продукта, который содержит установка. Статья посвящена определению количества тепла, выделяемого молнией в месте контакта ее с металлом, анализу распределения температур в металле и выбору безопасных толщин стенок контейнеров.

Применив известные формулы стационарной дуги, Петерс [Л. 4] подсчитал, что в период протекания импульса тока молний выделяется количество тепла, достаточное для расплавления 1 mm^3 меди или 100 mm^3 свинца. Последующие исследования отчетливо

показали, что при расчете термических воздействий молний необходимо считаться не только с кратковременным импульсом тока, на котором строил свои расчеты Петерс, но и с так называемой постоянной составляющей разряда.

Общеизвестно, что разряд молний представляет собой серию импульсов, следующих друг за другом через интервалы времени от 0,001 до 0,6 сек. Каждый отдельно взятый импульс, как показал Мак-Икрон¹ [Л. 5], имеет две составляющие; первая составляющая длится до $100 \mu \text{sec}$. Максимальные токи в этот период достигают сотен тысяч ампер. Длительность второй составляющей (постоянной составляющей) достигает 0,3 сек. при токах порядка $200 \div 300 \text{ A}$. Общее количество электричества, переносимое первой составляющей разряда, в среднем составляет доли кулона и может доходить до кулонов. В период постоянной составляющей протекает до 200 кулонов и более.

По данным Сьютса [Л. 6] равновесное состояние в дуге наступает спустя 10^{-3} сек. после ее возникновения, поэтому вторую составляющую с достаточными основаниями можно рассматривать, как дуговой процесс. Если учесть, что тепло, выделяемое дугой, пропорционально количеству протекающего электричества, то станет очевидным, что решающее значение в процессах оплавления имеет вторая составляющая и погрешности расчета из-за неточных представлений о первой составляющей весьма малы.

80% ударов молний в наземные объекты имеют отрицательную полярность. Они несут с собой большее количество электричества, чем положительные разряды. Металл служит им

¹ Мак-Икрон регистрировал кратерным осциллографом прямые удары молний в небоскреб.

анодом. Количество тепла W , выделяемого дугой на аноде, определяется из выражения [Л. 7]:

$$W = 0,24 UQ,$$

где Q — количество электричества; U — анодное падение потенциала плюс работа выхода в вольтах.

Разогрев анода возникает за счет бомбардировки металла электронами дуги, получающими ускорение в зоне анодного падения. Анодное падение примем для дальнейшего равным 6 В. Энергия работы выхода для железа, выделяемая при рекомбинации электронов с положительными зарядами анода, оценивается в 4 В. Таким образом $U \approx 6 + 4 = 10$ В.

Принимая для дальнейших расчетов длительность молнии в 1 сек. с общим количеством электричества в разряде 200 С, т. е. приняв параметры удара, вероятность появления которых не превышает 2% [Л. 1], легко подсчитать, что в месте контакта выделяется 480 cal/sec.

Распределение температуры в металле и выбор допустимых толщин стенок сооружений. Рассмотрим задачу о распределении тепла, выделенного молнией в металлической пластины.

Пусть источник тепла сосредоточен на поверхности пластины в точке O ($x=0, y=0, z=0$ (рис. 1)). Температурное поле определяется по методу отражений источника тепла от плоскостей $z=\delta$ и $z=0$, рассматриваемых в качестве теплонепроницаемых поверхностей. Теплоотдачей от этих плоскостей в течение $1 \div 5$ сек. пренебрегаем.

Существо метода сводится к тому, что пластина толщиной δ заменяется бесконечным пространством с бесконечным рядом тепловых источников, являющихся зеркальным отображением

источника ($x=0, y=0, z=0$) в плоскостях $z=\delta, z=0$.

Каждый источник имеет координаты $x=0, y=0, z=2n\delta$, где n принимает целые значения от 0 до $\pm\infty$. Из литературы [Л. 8] известно общее решение задачи и исследование стационарного потока тепла (предельное состояние нагрева при $t=\infty$) применительно к целям электросварки. Однако нас интересует нестационарный режим, расчет которого из интегральных уравнений упомянутого общего решения весьма громоздок.

Решим задачу иным способом. Температура точки A , удаленной на r_n от n -го источника тепла в бесконечном пространстве, определяется через изученные функции уравнением:

$$T_{An} = T_{nnp} \Psi_n(r_n, t). \quad (1)$$

$$T_{nnp} = \frac{W}{2\pi\lambda r_n} \quad (2)$$

— температура предельного установившегося состояния, где λ — коэффициент теплопроводности металла в $\text{cal}/\text{cm sec}^{\circ}\text{C}$.

$$\Psi_n = 1 - \Phi\left(\frac{r_n}{\sqrt{4at}}\right) \quad (3)$$

— коэффициент теплонасыщения, выражающий влияние продолжительности нагрева на распределение температуры;

$$\Phi(0) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^0 e^{-z^2} dz \quad (4)$$

— функция Крампа.

t — время; a — коэффициент температуропроводности в cm^2/sec .

Температурное поле от бесконечного ряда источников найдем простым суммированием:

$$T_A = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} T_{nnp} \Psi_n(r_n, t) = \frac{W}{2\pi\lambda} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{1}{r_n} \left[1 - \Phi\left(\frac{r_n}{\sqrt{4at}}\right) \right].$$

В дальнейшем нас будут интересовать значения температуры по оси z , каждая точка которой отстоит от источников тепла на расстоянии $r_n = z - 2n\delta$; таким образом уравнение можно упростить:

$$T_z = \frac{W}{2\pi\lambda} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{1}{(z-2n\delta)} \left[1 - \Phi\left(\frac{(z-2n\delta)}{\sqrt{4at}}\right) \right]. \quad (5)$$

Для времен $t = 1 \div 10$ сек. и $\delta = 0,1 \div 2$ см достаточно ограничиться 3—4 членами ряда, симметричными относительно нуля. Последующие члены изменяют результат не более чем на 1%.

Чтобы получить форму теплового импульса в любой точке $z \leq \delta$ не только в течение всего времени действия молнии ($t = 1$ sec.), но и после ее исчезновения, предположим, как это принято в теории теплопередачи, что источник тепла постоянно действует в точке O ($x=0, y=0, z=0$). Предполагаем далее, что спустя время τ

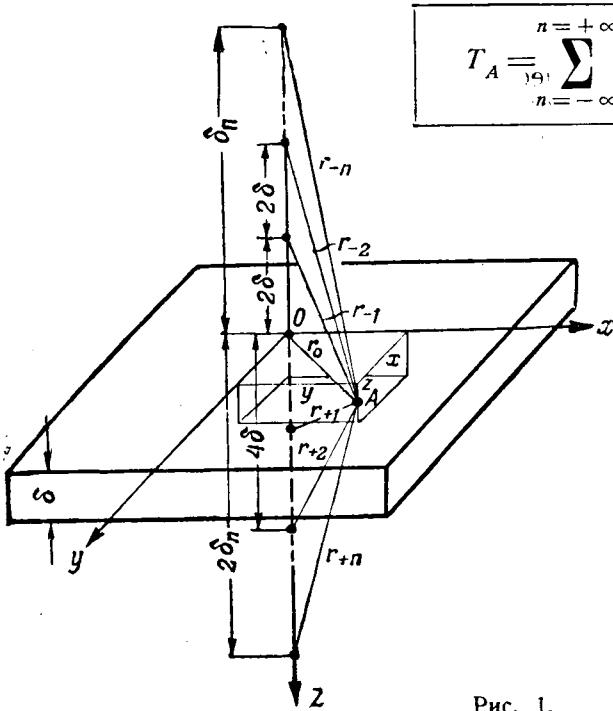


Рис. 1.

в той же точке приложен равной величины сток тепла, тогда истинная температура для времени $t \geq \tau$ определится разностью функций:

$$T_z = T_z(t) - T_z(t - \tau). \quad (6)$$

Дополнительно к указанным выше расчетным данным $W = 480 \text{ cal/sec}$, $\tau = 1 \text{ sec}$, было принято для железа $\lambda = 0,12$, $a = 9,22 \cdot 10^{-2}$. При принятых расчетных значениях величин были подсчитаны кривые изменения температуры в точке $z = \delta$, т. е. в точке, противоположной месту удара молнии. Результаты подсчета $T_\delta = f(t)$ для $\delta = 0,3, 0,4, 0,5, 0,8, 1,0 \text{ см}$ приведены на рис. 2.

Практически важный интервал времени лежит в пределах $0,1 \div 10 \text{ sec}$. Нагрев и охлаждение проходят в этот промежуток времени полный цикл. При $\delta = 0,3 \text{ см}$ металл проплавляется еще до того, как прервется молния. Дальнейший его нагрев вызовет испарение, поэтому температуры выше 1500°C нанесены пунктиром.

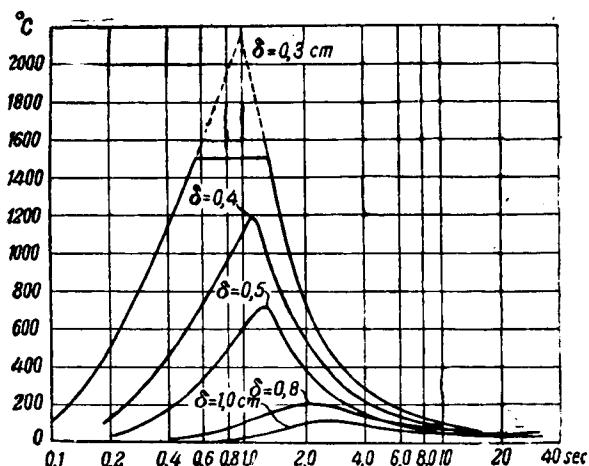


Рис. 2. Температура стенки листового металла, в зависимости от времени, в точке, противоположной месту удара молнии, при различной толщине металла δ .

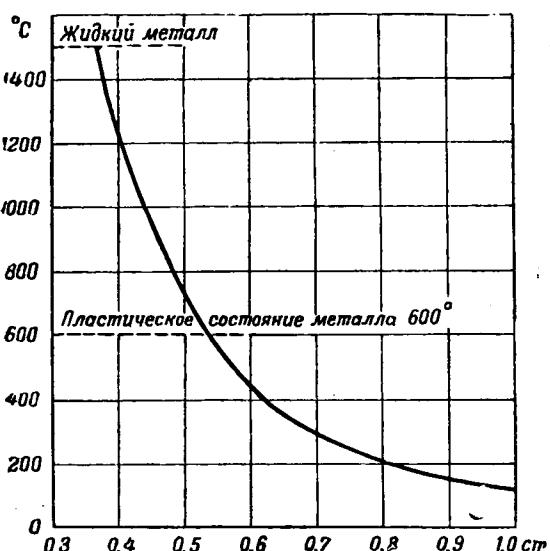


Рис. 3. К выбору толщины металла. Максимальная температура T_{\max} в зависимости от толщины листа δ .

Пренебрегая теплом, затрачиваемым на испарение, очевидно, преувеличивают значения температуры в различных точках, и, таким образом, получается некоторый расчетный резерв.

Характерной особенностью кривых является спадание максимума температуры с ростом δ и сдвиг его во времени за счет перераспределения тепла в металле после разряда молнии. Так, для $\delta = 0,8 \text{ см}$ температура достигает 210° спустя $1,0 \text{ sec}$. после прекращения молнии. Длительность существования температур $T \geq 100^\circ\text{C}$ уменьшается с ростом δ , достигая $7,8 \text{ sec}$. для $\delta = 0,4 \text{ см}$. При $\delta = 1,0 \text{ см}$ подъем температуры свыше 100°C столь мал, что им можно пренебречь.

Представленная на рис. 3 кривая $T_{\max} = f(\delta)$ позволяет осуществить выбор допустимой толщины металла для промышленных установок. Прямые $T = 1500^\circ$ и $T = 600^\circ\text{C}$ ограничивают область, в которой металл находится в пластическом состоянии. Там, где допустимо повышение температуры внутренней стенки до 1200°C и нет высоких давлений, можно ограничиться толщиной в $4 \div 5 \text{ mm}$.

В установках, содержащих газ или жидкость под давлением, толщину стенок не следует брать ниже $5,5 \div 6 \text{ mm}$. В противном случае силой давления разогретый металл будет разорван или выпущен. Проникновение горючего газа или жидкости сквозь разрыв приведет к пожару.

В ряде случаев молния, не прожигая металла, повреждает его, оставляя в нем характерную выемку или кратер, глубину которого необходимо оценить. Предполагая, что глубина кратера соответствует глубине проплавления металла, можно решить эту задачу аналогично предыдущей, по уравнениям (5) и (6).

На рис. 4 представлен ход изменения температуры в листе металла ($\delta = 0,8 \text{ см}$) на различных глубинах $z \leq \delta$.

Построив кривую $T_{z \max} = f(z)$ легко определить глубину проплавления z_0 . Она равна $2,5 \text{ mm}$.

Подобный же расчет, для нескольких иных данных, был проделан с целью сопоставления результатов подсчета с результатами эксперимента Мак-Икрона и Гагенгута [Л. 3] по прожиганию стального листа мощным искровым разрядом с последующим наложением дуги постоянного тока. Мак-Икрон и Гагенгут установили, что при прохождении 430°C в разряде на стальном листе остается выемка глубиной 4 mm .

Видимо, не придавая серьезного значения длительности разряда, авторы не указали, как долго существовала дуга. Благодаря этому исключается возможность точного сопоставления результатов. Если, однако, предположить, что разряд длился от $0,5$ до 1 sec , то по подсчетам глубина выемки достигает соответственно $5,2 \div 3,6 \text{ mm}$, т. е. примерно той же величины.

Попытку тех же авторов установить экспериментальную зависимость между количеством электричества Q в разряде и количеством выплавленного металла g , с целью определения подобного же соотношения для разрядов молний, следует признать неудачной. Влияние времени

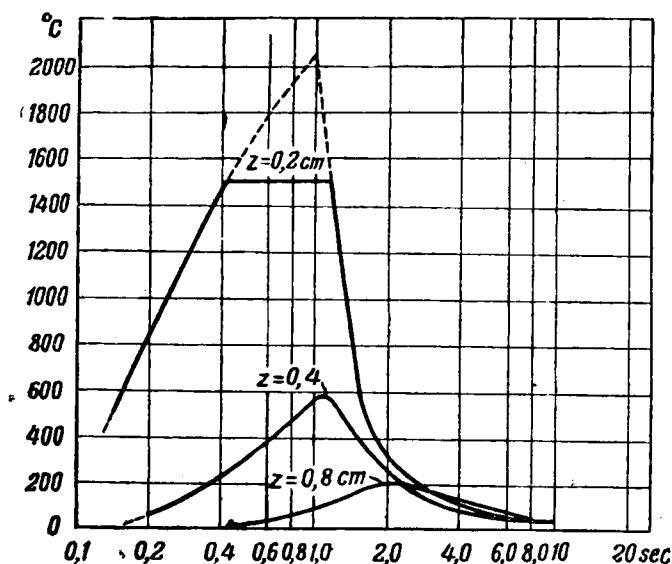


Рис. 4. Температура в толще металла в зависимости от времени при ударе молнии в стальной лист толщиной 0,8 см.

для толщин металла свыше 2 мм столь же существенно, что и величина Q . В природной молнии сочетание этих факторов столь многообразно, что установление однозначной зависимости между этими параметрами невозможно. Только для очень тонких листов ($\delta \leq 1$ мм), где коэффициент теплонасыщения $\Psi \approx 1$, можно найти непосредственное соотношение между величиной Q и количеством выплавленного металла.

Результаты подсчетов по уравнениям (5), (6), вероятно, близки к истинным.

Рекомендуемая нами минимальная толщина металла в 4–5 мм близка к толщинам стенок, употребляемых в промышленных сооружениях. Обычно для стальных резервуаров (нефтхимики) толщина стенок верхнего пояса принята в 5–6 мм. Номинальная толщина крыши — 3–5 мм.

Хранение сернистых нефтей и нефтепродуктов связано с коррозией стенок, в особенности верхнего пояса и крыши. При отсутствии надлежащего надзора за состоянием резервуара и при несвоевременном обновлении разъеденных элементов конструкции коррозия может привести к образованию сквозных отверстий. Поэтому при сооружении резервуаров даются добавки на коррозию (до 3 мм, США). Если нет уверенности в сохранности данной толщины крыши резервуаров, содержащих воспламеняющиеся продукты, грозозащита необходима.

Особенно сложно решить вопрос, необходима ли грозозащита для контейнеров, в которых нагрев стенок может повлечь за собой вспышку или взрыв содержимого. Если внутренняя стенка металла соприкасается с продуктами, находящимися в жидкой фазе, то при

отсутствии доступа воздуха нагрев допустим до высоких температур. В случае газов температура стенки при ударе молнии не должна достигать температуры воспламенения или взрыва.

Температура воспламенения воздухоуглеводородных смесей близка к 450°C. Чтобы избежать нагрева до этой температуры, требуется толщина стенок 6,5 мм. Далеко не всякая установка имеет такую толщину стенок. Однако в принятых нами расчетах имеется некоторый резерв, обусловленный тем обстоятельством, что при кратковременных тепловых импульсах температура воспламенения повышается. К сожалению, вопрос этот слабо изучен. Тем не менее предварительные данные позволяют оценить приблизительно возможное повышение температур вспышки. Например, взрыв 11% смеси метана с воздухом запаздывает на 1,5 sec., если воспламеняющий ее очаг в течение этого времени поддерживает температуру 775°C. Максимум будет существовать ничтожную долю времени, при ударе молнии в металл толщиной 5 мм. Предположительно можно утверждать, что воспламенения не произойдет, т. е. энергия теплового импульса при этом будет меньше энергии импульса, при котором была измерена температура вспышки в 775°C. Чтобы обосновать подобного рода расчеты, необходимо изучить влияние не только длительности, но и формы импульса на температуру воспламенения.

При оценке необходимости грозозащиты установок приходится считаться с тем, что критические температуры воспламенения гремучих воздухоуглеводородных смесей зависят от природы и величины зажигающей поверхности, а также от наличия примесей в гремучей смеси. Практически внутренняя поверхность стенки резервуара покрыта окислами железа. Хранение сернистых продуктов иногда сопровождается отложением сернистого железа, обладающего пирофорными свойствами. Наличие пирофорного железа способно весьма резко снизить температуру вспышки гремучей смеси вплоть до температуры самовоспламенения. Понятно, в таких случаях какой-либо дополнительный нагрев извне недопустим.

Литература

1. И. С. Стекольников. Физика молний и грозозащита. Изд. Академии наук СССР, 1943.
2. R. L. Belaschi. AIEE. Trans., August 1935.
3. K. B. McEachron and I. H. Hagedorn. AIEE. Trans., V. 61, № 8, 1942.
4. W. Peters. ETZ, Heft 13, 14, 1937.
5. K. B. McEachron. Journ. Fr. Inst., V. 227, № 2, 1939; El. Eng. V. 60, № 9, 1941.
6. GER. V. 39, № 4, 1936.
7. К. К. Хренов, В. И. Ярхо. Технология дуговой электросварки. Машгиз, 1940.
8. Н. Н. Рыкалин. Пространственное распределение температуры при дуговой сварке. Изд. Академии наук СССР, 1941.



Из научно-исследовательских работ

АВТОРЕФЕРАТЫ

Режим короткого замыкания в линиях электропередачи, настроенных на полволны

Доктор техн. наук, проф. А. А. ВУЛЬФ и инж. О. В. ЩЕРБАЧЕВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

В работе рассматривается установившееся трехфазное короткое замыкание в простейшей системе, состоящей из линии, настроенной на полволны, и эквивалентного генератора с реактивностью X_e . Настройка линии на полволны может быть осуществлена либо подбором частоты, либо применением любой из схем, рассмотренных нами ранее¹.

Прежде всего остановимся на случае внешнего короткого замыкания: будем считать, что оно произошло в непосредственной близости от конца линии, что равносильно условию $U_2 = 0$ (постоянные линии: $A = D = -1$, $B = C = 0$). Величина тока короткого замыкания определяется исключительно параметрами концевых устройств, при большой мощности которых она может быть весьма значительной. Напряжение на линии получается наибольшим в ее средней точке. Величина его пропорциональна току короткого замыкания и зависит от способа настройки линии. Кратность перенапряжения имеет тот же порядок, что и кратность тока короткого замыкания.

Внешнее короткое замыкание, однако, не является самым тяжелым для системы, содержащей линию, настроенную на полволны. Наиболее опасно для такой системы короткое замыкание в точке, отделенной от обобщенной э. д. с. генераторов нулевым эквивалентным сопротивлением. Такую точку мы будем называть точкой резонансного короткого замыкания.

Отметим предварительно несколько вспомогательных положений:

1. При коротком замыкании в конце и в начале системы с коэффициентами A , B , C , D сопротивления к. з., измеренные соответственно со стороны начала и конца системы, составляют:

$$Z_\kappa = \frac{B}{D}, \quad Z_n = \frac{B}{A}. \quad (1)$$

Для линии электропередачи это дает:

$$Z_\kappa = Z_n = j \frac{\sin \lambda}{\cos \lambda} = j \operatorname{tg} \lambda, \quad (2)$$

где λ — электрическая длина линии.

2. В случае линии, настроенной на полволны, сопротивления к. з. от любой точки ее до концов равны по величине и противоположны по знаку.

Действительно, решая систему уравнений:

$$\begin{aligned} A_0 &= A_1 A_2 + B_1 C_2 = -1, \quad B_0 = A_1 B_2 + B_1 D_2 = 0, \\ D_0 &= B_2 C_1 + D_1 D_2 = -1, \quad C_0 = A_2 C_1 + C_2 D_1 = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

можно легко получить:

$$\frac{B_1}{D_1} = - \frac{B_2}{A_2}, \quad (4)$$

что вместе с (1) доказывает вышеуказанное.

3. Эквивалентное сопротивление короткому замыканию от середины настроенной линии до ее концов равно бесконечности.

Средняя точка линии характеризуется равенствами:

$$B_1 = B_2, \quad C_1 = C_2, \quad A_1 = D_2, \quad D_1 = A_2. \quad (5)$$

Подставляя их в (4), получим:

$$D_1 = A_2 = 0 \quad \text{и} \quad \frac{B_1}{D_1} = - \frac{B_2}{A_2} = \infty. \quad (6)$$

Сказанное позволяет заключить, что величина эквивалентного сопротивления линии принимает все значения от нуля до $+\infty$ при передвижении точки короткого замыкания от генераторного конца линии до ее середины и все значения от $-\infty$ до 0 при передвижении ее от середины до конца.

Таким образом, на линии всегда окажется точка, эквивалентное сопротивление от которой до начала будет равно $(-X_e)$, что вместе с X_e генераторной станции дает в сумме нуль. Эта точка и является точкой резонансного короткого замыкания.

Расчеты резонансного короткого замыкания с учетом активных сопротивлений системы² дают весьма большие кратности тока короткого замыкания и перенапряжения на линии (кратностью порядка 15—20). Эти расчеты нельзя считать соответствующими действительности, вследствие того, что при таких больших напряжениях и токах на линии и в аппаратах могут возникнуть новые явления, которые должны быть учтены. Наиболее важным из таких явлений следует считать корону на линии передачи, создающую

² При наличии потерь введем новое определение режима резонансного короткого замыкания: будем называть так тот режим, в котором э. д. с. и ток генератора совпадают по фазе, — это означает, что эквивалентное сопротивление при коротком замыкании является чисто активным.

¹ Электричество, № 10 — 11, 1939 и № 1, 1940.

значительные потери, сглаживающие резонанс. Общее решение задачи с учетом короны потребовало бы интегрирования нелинейных уравнений линии (при переменной активной проводимости), что представляет весьма большие трудности.

В настоящей работе учет влияния короны произведен приближенным методом, предложенным инж. П. Е. Шпор (Ленгидэп). Линия передачи разбивается на ряд участков, на которых зависимость напряжения от длины принимается прямолинейной; распределенные потери на корону на таком участке учитываются активными проводимостями, сосредоточенными по его концам.

Ниже даны формулы для определения величины мощности этих проводимостей.

Пусть U_κ и $U_{\kappa p}$ — напряжения начала и конца участка; x — расстояние от произвольной точки участка до его конца; l — длина участка.

Тогда

$$U_x = U_\kappa + \frac{U_\kappa - U_{\kappa p}}{l} x. \quad (7)$$

Потери на корону (на километр) определяются по формуле:

$$P_x = a(U_x - U_{\kappa p})^2. \quad (8)$$

Подстановка (7) в (8) дает:

$$P_x = \frac{a}{l^2} [(U_\kappa - U_{\kappa p})^2 l^2 + (U_\kappa - U_{\kappa p})(U_\kappa - U_{\kappa p}) 2xl + (U_\kappa - U_{\kappa p})^2 x^2]. \quad (9)$$

Потери в начале и в конце участка находятся методом моментов:

$$P_\kappa = \int_0^l P_x \frac{x}{l} dx = al \left[\frac{1}{2} (U_\kappa - U_{\kappa p})^2 + \frac{2}{3} (U_\kappa - U_{\kappa p})(U_\kappa - U_{\kappa p}) + \frac{1}{4} (U_\kappa - U_{\kappa p})^2 \right], \quad (10)$$

$$P_{\kappa p} = \int_0^l P_x \frac{l-x}{l} dx = al \left[\frac{1}{2} (U_\kappa - U_{\kappa p})^2 + \frac{1}{3} (U_\kappa - U_{\kappa p})(U_\kappa - U_{\kappa p}) + \frac{1}{12} (U_\kappa - U_{\kappa p})^2 \right]. \quad (11)$$

В дальнейшем влияние короны на режимы короткого замыкания рассмотрено на частном примере линии длиной $l = 850$ км при частоте 100 Hz (рис. 1). Указанная линия³ электрической длиной $\lambda = 102^\circ$ разбита на 8 секций, на концах которых сосредоточены нагрузки от короны,

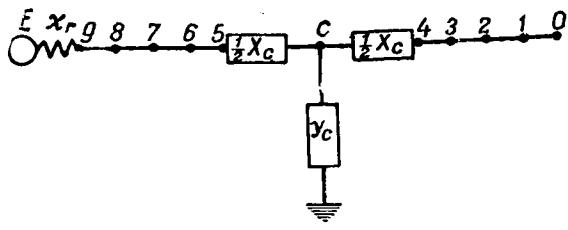


Рис. 1.

³ Настройка линии на полволны осуществлена при помощи схемы „q“, в которой: $\frac{1}{2} X_c = j \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}$; $Y_c = j \sin \lambda$.

параметры которой (в относительных единицах) таковы:

$$U_{\kappa p} = 1,16, \quad a = 5,55 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{km}}.$$

Для простоты активные сопротивления системы не учтены. Расчеты произведены графо-аналитическим методом.

При заданных положении точки короткого замыкания и значении тока в этой точке диаграмма токов и напряжений в системе дает распределение напряжения и тока вдоль линии. При резонансном коротком замыкании ток генератора является активным, а следовательно, можно найти э. д. с. и реактивность генератора, если известны векторы тока и напряжения начала линии.

Задаваясь различными значениями тока короткого замыкания и рассматривая ряд местоположений точки короткого замыкания, можно получить зависимости, дающие возможность судить о режимах короткого замыкания в настроенных линиях.

Нами рассмотрены наиболее существенные электрические характеристики системы при резонансном коротком замыкании, а именно: ток короткого замыкания I_κ , ток генератора I_e , активная мощность генератора P , его реактивность X_e , э. д. с. E , максимальное напряжение на линии U_κ и кратность напряжения на компенсирующей емкости $\frac{U_e}{U_{\kappa \text{ норм}}}$.

Для каждой точки короткого замыкания можно построить зависимости всех этих величин от одной из них. На рис. 2 приведены типичные кривые такого рода для точки короткого замыкания, находящейся на расстоянии от конца линии, соответствующем $\lambda = 37^\circ 50'$ (все величины даны в относительных единицах).

При определенной точке короткого замыкания величина реактивного сопротивления генератора, при котором данное короткое замыкание является резонансным, также зависит от э. д. с. генератора. Наличие этой зависимости объясняется нелинейностью короны, характер же ее показывает, что чем сильнее на линии сказывается явление короны, тем дальше резонансная точка короткого замыкания сдвигается от своего предельного положения (без учета короны), причем этот сдвиг происходит в сторону генератора.

На рис. 3 дана зависимость электрических характеристик системы при резонансном коротком замыкании от реактивности генератора при постоянной величине его э. д. с. (равной для данных кривых $E = 1,5$), но при различных положениях точки короткого замыкания. Кривые имеют максимум при $X_e = 0$, что свидетельствует о том, что системы с небольшими реактивностями генераторной станции обладают более тяжелыми режимами резонансного короткого замыкания.

Выясним теперь, является ли резонансное короткое замыкание при учете короны наиболее

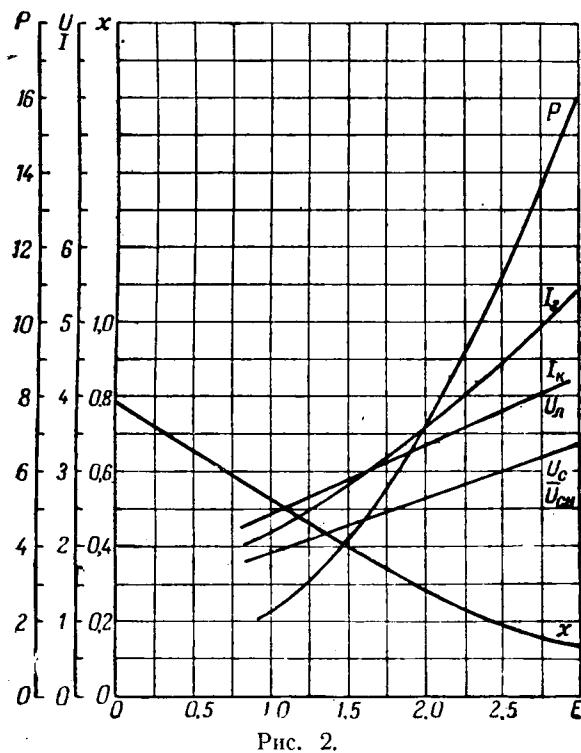


Рис. 2.

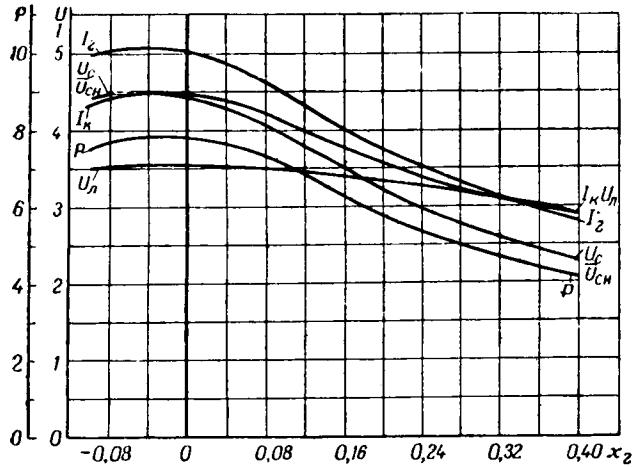


Рис. 3.

опасным для линий. На рис. 4 изображена зависимость электрических характеристик системы от расстояния точки короткого замыкания до конца линии при постоянных параметрах генератора ($E = 1,5$, $X_2 = 0,24$).

Кривые показывают, что резонансное короткое замыкание ($\cos \varphi = 1$), отмеченное вертикальной чертой, не является наиболее опасным, так как максимумы кривых соответствуют точкам короткого замыкания, лежащим дальше от генератора, чем резонансная точка. Это можно объяснить тем, что явление увеличения токов и напряжений при перемещении точки короткого замыкания по направлению к концу линии (показанное на рис. 3, где уменьшение X_2 влечет за собой указанное перемещение для сохранения резонанса) оказывается вблизи резонансной точки сильнее, чем собственно резонансные явления,

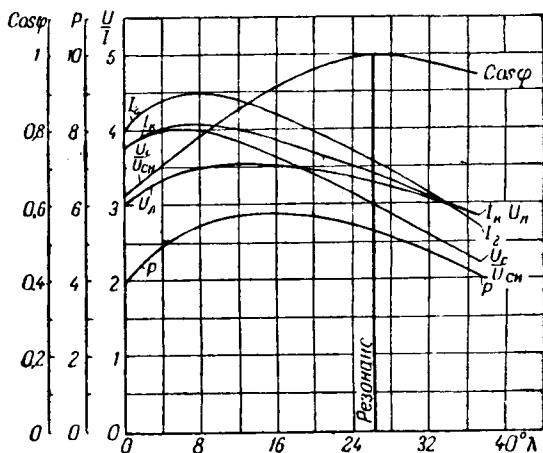


Рис. 4.

выраженные относительно слабо, вследствие большой активной мощности потерь на корону.

Таким образом при расчете настроенной линии следует искать наиболее опасный режим короткого замыкания вблизи от резонансного режима, причем точка короткого замыкания сдвинута относительно резонансной в сторону конца линии.

Наличие коротких замыканий, вызывающих перенапряжения на линии, является общим недостатком всех систем, содержащих линии, настроенные на полволны. Однако не следует преждевременно подвергать сомнению возможность применения настроенных линий вообще, так как нами рассматривался исключительно установившийся режим, а при такой большой электрической длине системы процесс установления режима будет, вероятно, довольно длительным. Кроме того, если даже на линии смогут появиться такие неблагоприятные условия, то для их устранения можно предложить весьма простую защиту, основанную на искусственном создании второго короткого замыкания, уже неопасного, которое можно получить при помощи разрядника, установленного в месте максимальных возможных перенапряжений (обусловленных тяжелым коротким замыканием).

Вследствие невозможности устранения перенапряжений при коротких замыканиях на линии можно допустить некоторые перенапряжения и при внешних коротких замыканиях (замыкания в приемной сети). Вероятно, будет наиболее целесообразным рассчитать систему так, чтобы перенапряжения при внешнем коротком замыкании создавали такую корону, мощность которой была бы равна нормальной передаваемой по линии мощности. При этом условия устойчивости системы получились бы весьма благоприятными.

В заключение следует отметить, что рассмотренные наиболее опасные режимы короткого замыкания не являются единственной особенностью настроенных линий при коротком замыкании. Другая особенность таких линий состоит в том, что *эквивалентное сопротивление от средней точки линии до генератора равно бесконечности*, что может вызвать трудности в отношении защиты от коротких замыканий.



О выборе асинхронного двигателя по среднему квадратичному моменту и току

Кандидат техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

Свердловск

Определение тока асинхронного двигателя в функции от нагрузки на валу. В расчетах электропривода и при производстве наладочных работ для двигателей с контактными кольцами (на всем диапазоне их работы) и короткозамкнутых двигателей (в пределах от скольжения, равного нулю, до опрокидывающего скольжения) обычно принимается прямо пропорциональное соотношение между током нагрузки двигателя и развиваемым им на валу моментом. Однако такая зависимость не всегда допустима и при определении уточненных значений средне-квадратичного момента электропривода или при выборе уставок токовых реле (в зависимости от нагрузки на валу двигателя) следует пользоваться более точной зависимостью $I = f(M)$. Установленные в некоторых работах [Л. 1, 2] подобные зависимости содержат только величину тока ротора, а не статора, данную притом не в функции от нагрузки на валу, а от скольжения. Кроме того, эта величина тока определяется по отношению ко вторичному току короткого замыкания, что лишает соответствующую формулу наглядности и делает ее практически неудобной.

В настоящей работе на основе круговой диаграммы выведена формула для тока статора в функции от нагрузки на валу, действительная для асинхронных двигателей с нормальным ротором и в первую очередь с контактными кольцами.

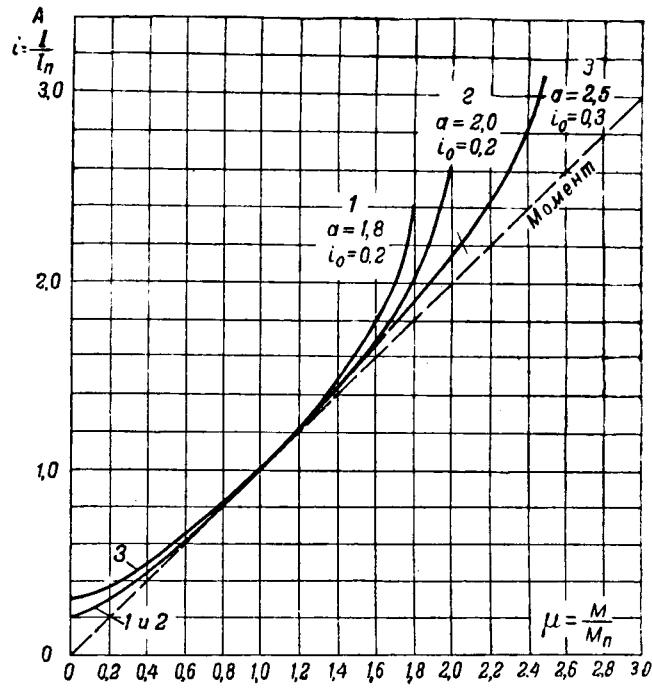
Эта формула имеет следующий вид:

$$i = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) a (a + \sqrt{a^2 - 1}) \left(1 \mp \sqrt{1 - \left(\frac{\mu}{a} \right)^2} \right)}, \quad (1)$$

где $i = \frac{I}{I_n}$ — относительный ток нагрузки; $i_0 = \frac{I_0}{I_n}$ — относительный ток холостого хода; $\mu = \frac{M}{M_n}$ — относительный момент (нагрузка) на валу двигателя; $a = \frac{M_k}{M_n}$ — кратность опрокидывающего момента.

Знак — в формуле относится к устойчивой части механической характеристики, а знак \mp — к неустойчивой ее части.

Вычисления по формуле (1) требуют знания только двух параметров: кратности опрокидывающего момента a и относительного тока холостого хода i_0 . Обе эти величины обычно



Кривые относительного тока асинхронного двигателя в функции относительного момента на валу (для устойчивой части характеристики)

известны или во всяком случае могут быть легко определены заранее.

На рисунке изображены кривые относительных

токов i в функции относительного момента нагрузки μ для ряда значений относительного тока холостого хода i_0 и различных кратностей опрокидывающего момента a , вычисленных по формуле (1). Множитель формулы: $a(a + \sqrt{a^2 - 1}) = c$ для ходовых значений a имеет величины, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

| $a =$ | 1,8 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
|--|------|------|------|------|
| $c = a(a + \sqrt{a^2 - 1}) =$ | 5,9 | 7,46 | 12,0 | 17,5 |
| $i_k = \sqrt{a(a + \sqrt{a^2 - 1})} =$ | 2,43 | 2,73 | 3,46 | 4,18 |

Так как величина i_0 колеблется обычно в пределах 0,2—0,4, то, полагая, что $i_0^2 \approx 0$, получаем отклонение от истинного значения тока всего лишь на 2—5%. При этом выражение для тока i принимает следующий вид:

$$i \approx \sqrt{a(a + \sqrt{a^2 - 1})} \cdot \sqrt{1 \mp \sqrt{1 - \left(\frac{\mu}{a}\right)^2}} = i_k \sqrt{1 \mp \sqrt{1 - \left(\frac{\mu}{a}\right)^2}}. \quad (2)$$

При $\mu = a$, т. е. когда момент нагрузки $M = M_k$,

$$i = i_k \approx \sqrt{a(a + \sqrt{a^2 - 1})}. \quad (3)$$

Следовательно, i_k представляет собой приближенное значение тока статора в том случае, когда двигатель развивает свой опрокидывающий момент. Более точное значение тока i_k получается из полной формулы (1), если в ней положить $\mu = a$; тогда

$$i_k = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2) a(a + \sqrt{a^2 - 1})} = \\ = \sqrt{i_0^2 + c(1 - i_0^2)}. \quad (4)$$

Величины i_k , подсчитанные для ряда значений i_0 и a по формуле (4), приведены в табл. 2, где они даны в числителе дроби. Если же полученные кратности тока в точке опрокидывающего момента разделить на соответствующие кратности опрокидывающего момента a , то получаются значения кратности отношений $\frac{i_k}{a} = \frac{I_k M_n}{I_n M_k}$, приведенные в знаменателе дроби той же таблицы.

Из таблицы видно, что кратность тока в точке опрокидывания превосходит кратность опрокидывающего момента всего лишь на 20—35%.

Таблица 2

| $i_0 \backslash a$ | 1,8 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,15 | 2,41 1,34 | 2,7 1,35 | 3,42 1,37 | 4,14 1,38 |
| | | | | |
| 0,20 | 2,39 1,33 | 2,68 1,34 | 3,39 1,35 | 4,12 1,37 |
| | | | | |
| 0,30 | 2,33 1,29 | 2,62 1,31 | 3,31 1,32 | 4,01 1,33 |
| | | | | |
| 0,40 | 2,23 1,25 | 2,53 1,26 | 3,19 1,27 | 3,85 1,28 |
| | | | | |
| 0,50 | 2,16 1,20 | 2,41 1,20 | 3,04 1,21 | 3,65 1,22 |
| | | | | |

Необходимо отметить, что, полагая $i_0 = 0$, мы тем самым приравниваем ток статора току ротора, как это и следует из круговой диаграммы. В этом случае формула (2), для которой значения i_k берутся из табл. 1, может

одновременно служить и для расчета тока ротора (при различных режимах нагрузки), знание которого необходимо при проектировании схем управления.

Необходимая поправка к обычной формуле среднего квадратичного момента. Величина среднего квадратичного момента асинхронного двигателя, знание которой необходимо при расчете электроприводов с переменной нагрузкой, определяется по общезвестной формуле¹

$$\mu_e' = \sqrt{\frac{\int \mu^2 dt}{T}} \approx \sqrt{\frac{\Sigma \mu^2 t}{T}} \quad (5)$$

лишь при том условии, что связь между током и моментом выражается или прямо пропорциональной зависимостью или по формуле (1).

Так как в действительности эта зависимость более сложна, то в формулу (5) следует ввести поправочный множитель λ для перехода от моментов к токам, согласно уравнению

$$\int t^2 dt = \int \left(\frac{i}{\mu}\right)^2 dt = \int (\lambda \mu)^2 dt, \quad (6)$$

где $\lambda = \frac{i}{\mu}$ обозначает отношение кратности тока к кратности момента.

Этот поправочный коэффициент λ для нагрузок двигателя в пределах от холостого хода до номинальной равен практически единице. Для нагрузок свыше номинальной и до опрокидывающего момента λ возрастает от единицы до своего максимального значения $\lambda_k = 1,38$, указанного в табл. 2.

В общем виде установить влияние уточнения (с помощью множителя λ) на величину среднего квадратичного момента довольно затруднительно, так как оно зависит от: 1) коэффициента формы графика моментов двигателя; 2) отношения пикового момента по графику к номинальному моменту двигателя; 3) самого вида графика. Более подробные исследования показывают, что благодаря ограниченному отношению пикового момента к номинальному моменту двигателя или к среднему моменту графика (из-за необходимости обеспечения устойчивой работы) увеличение среднего квадратичного момента составляет лишь 5—25% (против значения его без учета среднеквадратичного тока).

Большие цифры (15—25%) относятся к графикам прямолинейно-ступенчатого характера (например, двухучастковый график). Меньшие цифры (5—15%) могут иметь место в графиках с пиковыми очертаниями. К последним относятся также графики работы асинхронного двигателя с маховиком (например, в приводе прокатного стана), у которых необходимая поправка к величине среднего квадратичного момента определяется приблизительно в размере 10%. При этом предполагается, что в наиболее тяжелом проходе (пике нагрузки) двигатель нагружается до своего опрокидывающего момента.

¹ Все моменты принимаются в относительных величинах μ в отношении к минимальному моменту двигателя.

Необходимо еще раз отметить, что в графиках работы двигателя, смягчением действием маховика (т. е. с непрямоугольными очертаниями пиков), разница в результатах расчетов по току и по моменту сглаживается и, как показали расчеты, может составлять 5—12%.

Поэтому не следует делать слишком пессимистических выводов о недостаточности мощности двигателей, выбираемых по среднему квадратичному моменту. Однако во всех случаях, когда необходимо отразить истинную картину загрузки двигателя по нагреву, и особенно для приводов ответственного значения, выбор двигателя должен производиться по среднему квадратичному току, согласно указанным в настоящей работе формулам, а не по моменту.

Практические указания к определению среднего квадратичного тока. Для облегчения подсчета величины среднего квадратичного тока или точнее для возможности перехода от величины среднего квадратичного момента к величине среднего квадратичного тока без промежуточных вычислений предлагается следующая эмпирическая формула:

$$M_e' = M_e \cdot \left(\frac{i}{m} \right)^\alpha, \quad (7)$$

где M_e — средний квадратичный момент двигателя, найденный обычным путем по графику работы двигателя; M_e' — искомый средний квадратичный момент двигателя, увеличенный соответственно среднему квадратичному току; $\left(\frac{i}{m} \right)$ — коэффициент кратности тока, отвечающий предельному моменту, который развивает двигатель по графику нагрузки (отношение кратности тока к кратности момента, нормально равное $\frac{i_k}{a}$), α — показатель степени;

значения последнего для разных графиков нагрузки, вид множителя $\left(\frac{i}{m} \right)^\alpha$ и его значения (при $\alpha = 2$ и $i_0 = 0,2$) для тех же условий приведены в табл. 3.

Таблица 3

| Значение α | Короткие пики и острые пики (смягчаемые маховиком) | | | Продолжит. пики и прямые угольные пики (не смягчаемые маховиком) |
|---|--|--|--|--|
| | Прокатные станы | Графики с более высоким значением ПР % | 2/3 | |
| Вид множителя $\left(\frac{i}{m} \right)^\alpha$ | $\sqrt[3]{\frac{i}{m}}$ | $\sqrt{\frac{i}{m}}$ | $\sqrt[3]{\left(\frac{i}{m} \right)^2}$ | |
| Примерное значение $\left(\frac{i_k}{a} \right)^\alpha$ при $a = 2$; $i_0 = 0,2$ | 1,1 | 1,16 | 1,22 | |

Литература

1. И. А. Сыромятников. Основные свойства асинхронных двигателей. Электрические станции, №4, 1935.
2. Руководящие указания по релейной защите, т. II, ч. VI, 1939.



Уравнения кривых намагничивания трансформаторной стали

Инж. А. А. ВОСКРЕСЕНСКИЙ и Е. Ф. ВОСКРЕСЕНСКАЯ

Горький

Аналитические методы расчета электрических цепей, содержащих индуктивности с железом, можно упростить, если пользоваться уравнениями, выражающими зависимость намагничивающих удельных ампервитков aw от индукции в стали B_{\max} . Подобное уравнение рекомендуется, например, „Руководящими указаниями по релейной защите“ [Л. 1] в виде:

$$aw = mB_{\max}^d, \quad (1)$$

где m — коэффициент, зависящий от сорта железа ($0,0023 \div 0,0045$), а показатель степени d принимают равным $0,6 \div 0,7$. Уравнение (1) позволило ввести в практику расчетов цепей трансформаторов тока коэффициента A , определяющий зависимость полного сопротивления намагничивания трансформатора Z_x от э. д. с. вторичной обмотки E_2 , простым соотношением:

$$Z_x = AE^{0,4}. \quad (2)$$

Область применения уравнения (2) ограничивается значениями магнитной индукции, лежащими на кривой намагничивания до начала ее перегиба при насыщении (обычно $6000 \div 7000$ Г).

Представляет интерес рассмотреть возможность составления уравнений, удовлетворяющих значениям индукции и в области высоких насыщений.

Хорошим вспомогательным средством к установлению формул эмпирически найденных зависимостей может служить применение так называемых функциональных сеток [Л. 2]. Так, точки кривой намагничивания, показанной на рис. 1, перенесенные на логарифмическую сетку (рис. 2), располагаются по прямой линии при значениях магнитной индукции от нуля до 1000 Г. Точки той же кривой, перенесенные на полулогарифмическую сетку (рис. 3), располагаются по прямой линии при значениях магнитной индукции от 2500 Г и выше. Следовательно, в начальной части кривая удовлетворяет уравнению вида:

$$y = bx^k, \quad (3)$$

а в линейной части и области насыщения удовлетворяет уравнению:

$$y = me^{ax}. \quad (4)$$

Для практических расчетов удобнее иметь одно уравнение, отображающее зависимость $aw = f(B_{\max})$ на всем диапазоне кривой намагничивания. Кривая намагничивания напоминает гиперболический синус

$$y = \frac{e^x - e^{-x}}{2}.$$

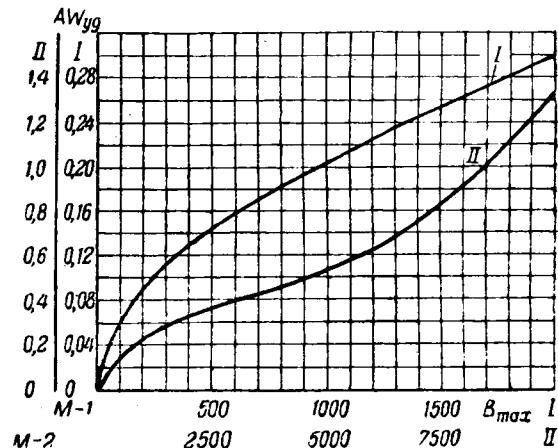


Рис. 1. Характеристика намагничивания железа в декартовых координатах.

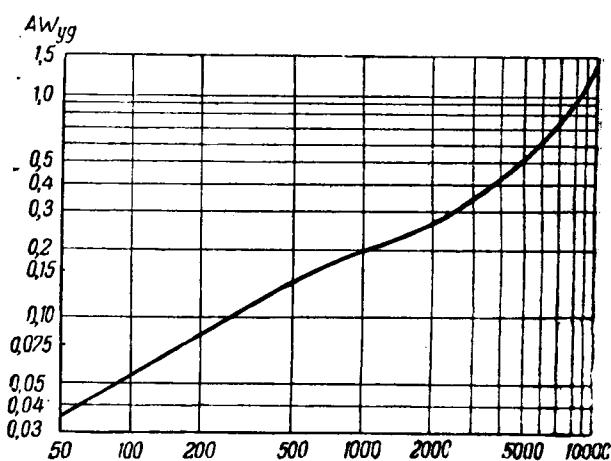


Рис. 2. Характеристика намагничивания железа на логарифмической сетке.

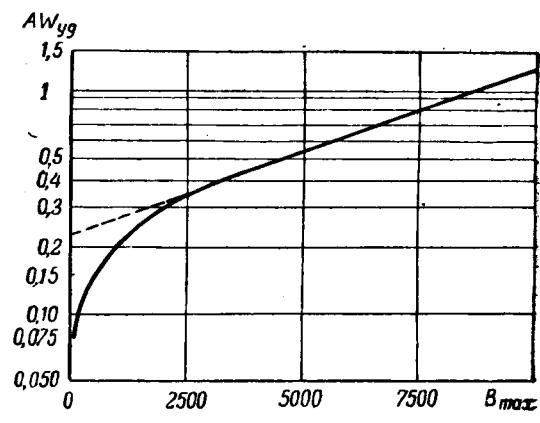


Рис. 3.

Если использовать сходство этих кривых, то можно применить формулу:

$$aw = m \left(e^{aB_{\max}} - e^{-bB_{\max}} \right). \quad (5)$$

Член $e^{-bB_{\max}}$, входящий в (5), по мере увеличения индукции уменьшается, и при значениях индукции, относящихся к линейной части и области насыщения, практически не оказывает влияния на величину aw .

При $e^{-bB_{\max}} \approx 0$ для кривой намагничивания сохраняется уравнение вида:

$$aw = me^{aB_{\max}}. \quad (6)$$

Коэффициент a определяется, если прологарифмировать уравнение (6) и подставить две пары соответствующих друг другу значений aw и B_{\max} , относящихся к линейной части кривой намагничивания или к области насыщения:

$$\lg aw'' = \lg m + a \lg e B''_{\max},$$

$$\lg aw' = \lg m + a \lg e B'_{\max},$$

$$\lg aw'' - \lg aw' = (B''_{\max} - B'_{\max}) a \lg e;$$

откуда

$$a = 2,3 \frac{\lg aw'' - \lg aw'}{B''_{\max} - B'_{\max}}. \quad (7)$$

Коэффициент m определяется непосредственно из уравнения (6), если подставить в уравнение одну пару соответствующих друг другу значений aw и B_{\max} , так же относящихся к линейной части кривой намагничивания или области насыщения

$$m = \frac{aw}{e^{aB_{\max}}}. \quad (8)$$

Коэффициент b можно определить по найденным константам m и a , если подставить в уравнение (5) одну пару соответствующих друг другу значений aw и B_{\max} , относящихся к начальной части кривой намагничивания (300–500 Г). При анализе ряда кривых намагничивания установлено общее для всех кривых соотношение:

$$b = (10 \div 15) a. \quad (9)$$

Прим. Для вычисления констант кривой рис. 1 берем точки с координатами $B_{\max} = 9000$ Г, $aw = 1,1$, и согласно (7)

$$a = 2,3 \frac{\lg 1,1 - \lg 0,4}{9000 - 3000} = 0,00017,$$

согласно (8)

$$m = \frac{1,1}{e^{0,00017 \cdot 9000}} = 0,24.$$

Значение b уточняем по соотношению (5) для точки с координатами $B_{\max} = 300$, $aw = 0,11$.

$$b = -\frac{\lg \left(e^{0,00017 \cdot 300} - \frac{0,11}{0,24} \right)}{300 \lg e} = 0,00175,$$

т. е. $b \approx 10 a$.

Уравнение кривой рис. 1 будет иметь вид:

$$aw = 0,24 \left(e^{0,00017 B_{\max}} - e^{-0,0017 B_{\max}} \right).$$

В таблице сопоставлены значения удельных ампервитков кривой рис. 1 и подсчитанных по только что найденному соотношению.

| B_{\max} , G | 100 | 200 | 750 | 1 500 | 3 000 | 6 000 | 10 000 |
|-------------------------------|-------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| aw по кривой намагничивания | 0,03 | 0,11 | 0,18 | 0,27 | 0,4 | 0,63 | 1,33 |
| Расчетные значения aw | 0,037 | 0,11 | 0,2 | 0,29 | 0,4 | 0,66 | 1,32 |

Расчетные значения удельных ампервитков практически совпадают со значениями кривой намагничивания. Наблюдаемые отклонения не являются существенными для технических расчетов, тем более, что точность кривых намагничивания, снятых опытным путем, не очень велика. При исследовании кривых намагничивания трансформаторной стали завода "Электроаппарат" [Л. 1] выявлена была возможность принять коэффициент a равным среднему его значению $2 \cdot 10^{-4}$ и соответственно коэффициент b до $3 \cdot 10^{-3}$. Коэффициент m в зависимости от сорта стали лежит в пределах 0,14–0,32. При средних значениях коэффициентов a и b может быть предложен общий вид уравнения кривых намагничивания:

$$aw = m \left(e^{2 \cdot 10^{-4} B_{\max}} - e^{-3 \cdot 10^{-3} B_{\max}} \right). \quad (10)$$

Выводы. 1. Кривые намагничивания трансформаторной стали могут удовлетворять вполне определенному виду уравнения при изменении индукции от начальных значений до области высоких насыщений.

2. Для выполнения электромагнитных расчетов целесообразно иметь уравнения и константы кривых намагничивания стали от заводов-изготовителей.

Литература

1. Руководящие указания по релейной защите, ч. I, ОНТИ, 1937, ч. II, ОНТИ, 1939.

2. Н. А. Глаголев. Теоретические основы намагничивания. ОНТИ, 1934.



Расчет вращающего момента индукционного реле направления мощности

Кандидат техн. наук, доц. Б. К. БУЛЬ

Московский энергетический институт им. Молотова

Магнитная система, изображенная на рис. 1 и несколько видоизмененная, получила весьма большое распространение. Она использована заводом ХЭМЗ и рядом фирм (GEC, Metro-Vickers и др.) для реле тока, реле направления мощности и других типов реле, а также для измерительных приборов. Несмотря на столь большое распространение, теория ее и расчет в литературе почти не затронуты.

При рассмотрении полагаем, что верхний и нижний магнитопроводы расположены симметрично друг относительно друга и что сопротивление железа и реакция диска отсутствуют.

Вначале рассмотрим магнитную систему, имеющую одинаковые охвачи площадок магнитопроводов в воздушном зазоре. При выполнении магнитной системы согласно рис. 1 площадки (показанные пунктиром) имеют симметричное расположение (рис. 2). Эти площадки¹ являются

местами наибольшей концентрации магнитного потока, так как обладают наибольшей магнитной проводимостью.

В действительности, в рабочем зазоре кроме потоков, проходящих через заштрихованные площадки, имеются еще потоки выпучивания, которые можно учесть, пользуясь кривыми Шмиделя [Л. 1]. В результате получаем, что диск в воздушном зазоре пронизывается реальными потоками² Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 и Φ_4 . Результирующий вращающий момент представляет алгебраическую сумму моментов попарно взятых полюсов:

$$M_{sp} = \frac{2\Delta f}{981 \cdot 10^9} (x_{12}\Phi_1\Phi_2 \sin \psi_{12} + x_{13}\Phi_1\Phi_3 \sin \psi_{13} + x_{14}\Phi_1\Phi_4 \sin \psi_{14} + x_{23}\Phi_2\Phi_3 \sin \psi_{23} + x_{24}\Phi_2\Phi_4 \sin \psi_{24} + x_{34}\Phi_3\Phi_4 \sin \psi_{34}) \quad (1)$$

Здесь Δ —толщина диска в см; f —частота переменного тока в Hz; ρ —удельное сопротивление материала диска в $\Omega \text{ см}$; ψ_{12} , ψ_{13} , ψ_{14} , ψ_{23} , ψ_{24} и ψ_{34} —сдвиги фаз между соответствующими магнитными потоками; x_{12} , x_{13} , x_{14} , x_{23} , x_{24} и x_{34} —геометрические постоянные для соответствующей пары прямоугольных полюсов, допускающие расчет по полученным автором [Л. 2] уравнениям

$$x_{12} = x_{34} = \frac{h_0}{(a_0 - b_0)} \left[\lambda_{13} - \frac{(a_0 - b_0)^2}{(1 - a_0^2 - h_0^2)(1 - b_0^2 - h_0^2) + (a_0 - b_0)^2} \right], \quad (2)$$

$$x_{13} = x_{24} = \frac{h_0}{(a_0 + b_0)} \left[\lambda_{13} - \frac{(a_0 + b_0)^2}{(1 - a_0^2 - h_0^2)(1 - b_0^2 - h_0^2) + (a_0 + b_0)^2} \right], \quad (3)$$

$$x_{14} = \frac{h_0}{2a_0} \left[\lambda_{14} - \frac{4a_0^2}{(1 - a_0^2 - h_0^2)^2 + 4a_0^2} \right], \quad (4)$$

$$x_{23} = \frac{h_0}{2b_0} \left[\lambda_{23} - \frac{4b_0^2}{(1 - b_0^2 - h_0^2)^2 + 4b_0^2} \right], \quad (5)$$

где

$$a_0 = \frac{a}{R}, \quad b_0 = \frac{b}{R} \quad \text{и} \quad h_0 = \frac{h}{R}. \quad (6)$$

Геометрические значения величин a , b , h и R указаны на рис. 2.

Коэффициенты λ_{13} , λ_{13} , λ_{14} и λ_{23} , учитывающие переход от круглых (точечных) полюсов к прямоугольным [Л. 3], определяются по кривым Двайта рис. 3 [Л. 4] соответственно для расстояний между полюсами:

$$C_{13} = C_{34} = a - b, \quad C_{13} = C_{24} = a + b, \quad C_{23} = 2b \quad \text{и} \quad C_{14} = 2a.$$

² Взяты эффективные значения.

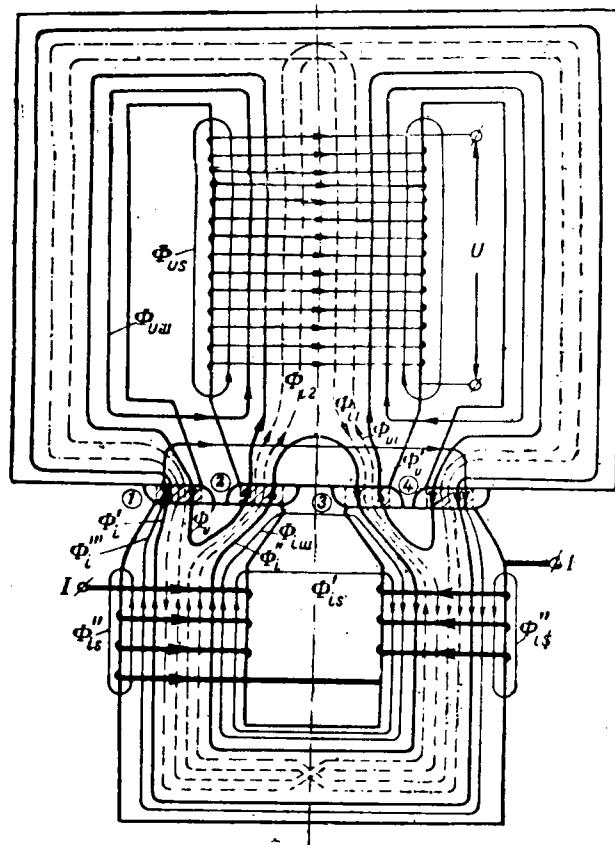


Рис. 1.

Распределение магнитных потоков в индукционном реле направления мощности со сложным магнитопроводом.

¹ Условно называемые ниже полюсами.

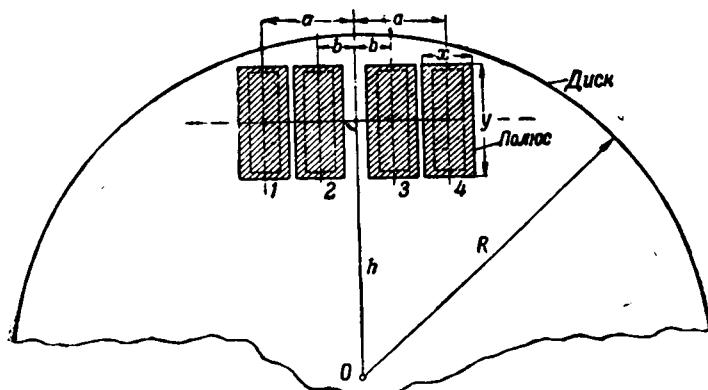


Рис. 2.

Расположение полюсов относительно диска.

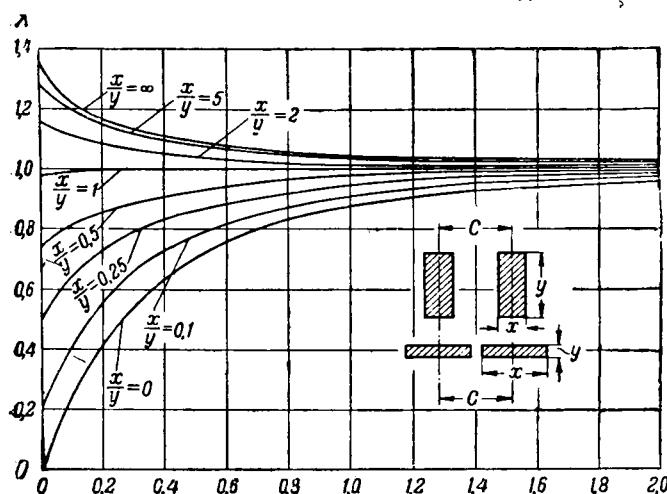


Рис. 3.

Кривые поправочных коэффициентов, учитывающих переход от точечных полюсов к прямоугольным.

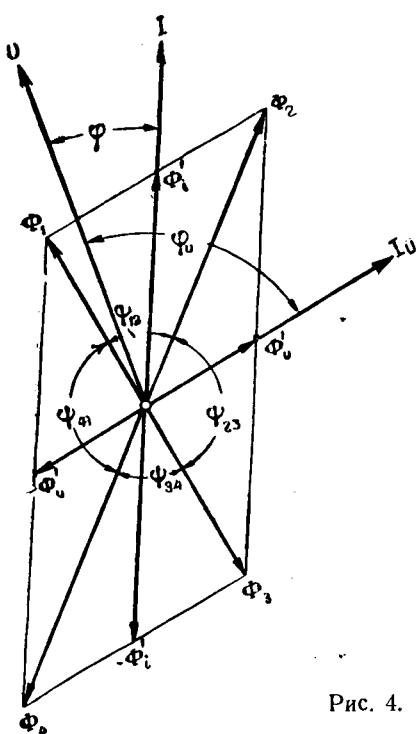


Рис. 4.

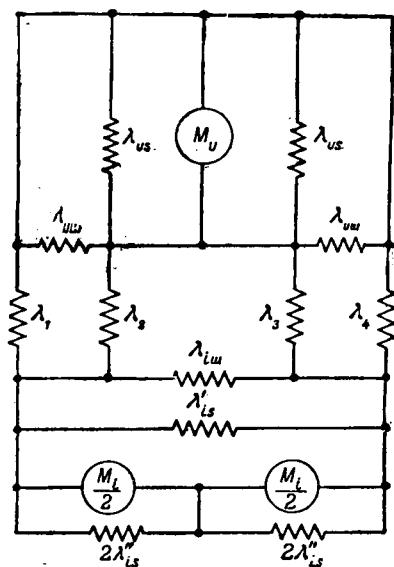
Векторная диаграмма при условии $\Phi'_u \neq \Phi'_i$.

Рис. 5.

Расчетная схема замещения магнитной системы реле.

Для определения углов между реальными потоками, а также для приведения уравнения момента к более простому виду на рис. 4 построена векторная диаграмма по следующим уравнениям⁸:

$$\bar{\Phi}_1 = \bar{\Phi}'_i - \bar{\Phi}'_u, \quad (7)$$

$$\bar{\Phi}_2 = \bar{\Phi}'_i + \bar{\Phi}'_u, \quad (8)$$

$$\bar{\Phi}_3 = -\bar{\Phi}'_i + \bar{\Phi}'_u, \quad (9)$$

$$\bar{\Phi}_4 = -\bar{\Phi}'_i - \bar{\Phi}'_u. \quad (10)$$

Из векторной диаграммы следует:

$$\Phi_1 = \Phi_3 \text{ и } \Phi_2 = \Phi_4, \quad \psi_{13} = \psi_{24} = 180^\circ, \quad \psi_{12} = \psi_{34},$$

$$\psi_{23} = 180^\circ - \psi_{12}, \quad \psi_{14} = 180^\circ + \psi_{12}.$$

Если учесть эти соотношения, то уравнение (1) перепишется следующим образом:

$$M_{ep} = \frac{2\Delta f x}{981 \cdot 10^9 \rho} \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi_{12}, \quad (11)$$

где геометрическая постоянная для четырех полюсов, расположенных по хорде диска,

$$x = 2x_{12} - x_{14} - x_{23}. \quad (12)$$

Теперь, если положить, что $\Phi'_i = \Phi'_u$, $\varphi = 0$ и импедансный угол катушки напряжения равен 90° , то вращающий момент

$$M_{ep} = \frac{2\Delta f x}{981 \cdot 10^9 \rho} \cdot \Phi_1^2. \quad (13)$$

При этом наиболее благоприятном случае параллелограм $\Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 \Phi_4$ на векторной диаграмме превращается в квадрат.

Выразим в уравнении (11) реальные магнитные потоки через потоки, создаваемые порознь катушкой тока и катушкой напряжения:

$$M_{ep} = \frac{2\Delta f x}{981 \cdot 10^9 \rho} \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi_{12} = \frac{2\Delta f x}{981 \cdot 10^9 \rho} [\bar{\Phi}_1 \bar{\Phi}_2] =$$

$$= \frac{4\Delta f x}{981 \cdot 10^9 \rho} \cdot \Phi'_i \Phi'_u \sin (\varphi_u - \varphi). \quad (14)$$

⁸ Поток $\Phi''_i = 0$, так как сопротивление железа не учитывается.

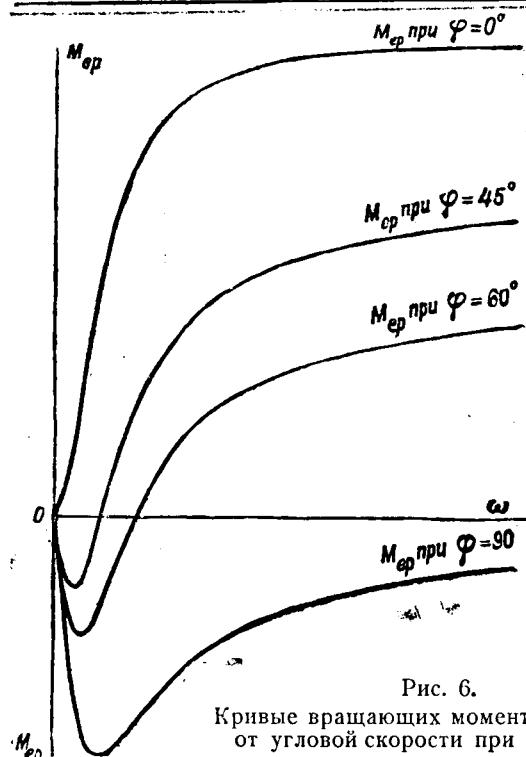


Рис. 6.
Кривые вращающих моментов в функции
от угловой скорости при $T_u = \text{const.}$

Потоки Φ'_i и Φ'_u представим через известные величины I и U , а также через конструктивные параметры. Получим:

$$\Phi'_i = \frac{\lambda_1 \lambda_4}{\lambda_1 + \lambda_4}, \quad M_i = 0,2\pi\lambda_1 w_i I, \quad (15)$$

$$\Phi'_u = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad M_u = 0,2\pi\lambda_1 w_u \frac{U}{R_u V \sqrt{1 + \omega^2 T_u^2}}. \quad (16)$$

Здесь $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и λ_4 —магнитные проводимости соответствующих рабочих зазоров, M_u и w_u , M_i и w_i —магнитодвижущие силы и витки катушки напряжения и тока. T_u —постоянная времени катушки напряжения, равная отношению коэффициента самоиндукции L_u к активному сопротивлению R_u , где

$$L_u = 0,8\pi w_u^2 \cdot 10^{-8} \left(\lambda_{us} + \lambda_{uu} + \frac{\lambda_1}{2} \right). \quad (17)$$

На рис. 5 представлена схема замещения магнитной цепи, где λ_{us} , λ_{uu} , λ'_{is} , λ''_{is} и λ_{iu} —магнитные проводимости для потока рассеяния и потока магнитного шунта, соответственно, для катушек напряжения и тока.

Тогда, учитывая (14)–(16), окончательно получим расчетное выражение для вращающего момента:

$$M_{ep} = \frac{8\pi\lambda^2 \Delta w_i w_u I U}{981 \cdot 10^{11} \rho R_u} \cdot \frac{\omega(\omega T_u \cos \varphi - \sin \varphi)}{(1 + \omega^2 T_u^2)} [\text{gcm}]. \quad (18)$$

Максимальное и нулевое значение момента получим соответственно при соотношениях

$$\omega = \frac{1 - \cos \varphi}{T_u \sin \varphi}, \quad (19)$$

$$\omega = \frac{\tan \varphi}{T_u}. \quad (20)$$

По полученным уравнениям построены кривые, представленные на рис. 6.

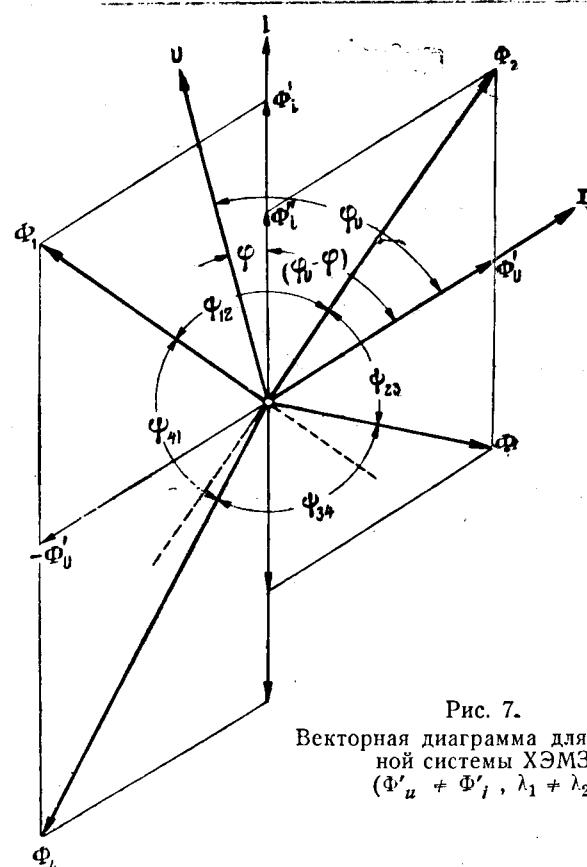


Рис. 7.
Векторная диаграмма для магнитной системы ХЭМЗ
($\Phi'_u + \Phi'_i, \lambda_1 + \lambda_2$).

Как видно из кривых и уравнения (18), знак момента зависит от угла φ , угловой скорости ω и постоянной времени катушки напряжения T_u .

Выражение (18) позволяет также определить влияние на вращающий момент магнитных проводимостей (λ_1, λ_{us} и λ_{uu}) числа витков катушки напряжения w_u и ее омического (R_u) и индуктивного (X_u) сопротивления и величины полюсного охвата (h).

В заключение рассмотрим, пользуясь вышеизложенным методом, магнитную систему ХЭМЗ. Для нее имеем магнитные проводимости $\lambda_1 = \lambda_4$ и $\lambda_2 = \lambda_3$, и тогда, принимая во внимание соотношение (1) и векторную диаграмму рис. 7, получим расчетное выражение для геометрической постоянной:

$$x = (x_{12} + x_{13} - x_{14}) + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (x_{12} - x_{13} + x_{23}). \quad (21)$$

Выражения (12), (18), (21) позволяют, изменяя конструктивные параметры магнитной цепи и расположение ее относительно диска, подсчитать момент и найти его оптимальные условия.

Литература

1. Б. С. Сотсков. Элементы телемеханической и автоматической аппаратуры, ч. 1. Реле, 1938.
2. Б. К. Буль. Исследование индукционных реле при переменной частоте и несинусоидальной форме кривой тока и напряжения. МЭИ, 1941.
3. Б. И. Филипович. Метод расчета вращающего момента индукционных систем с круглым диском. Электричество, № 7, 1939.
4. Н. В. D w i g h t. Repulsion Between Strap Conductors. El. World, v. 70, p. 522–524, 1917.



Научная сессия Московского энергетического института им. Молотова

В Московском ордена Ленина энергетическом институте им. В. М. Молотова с 23 по 27 января 1946 г. проходила научная сессия, посвященная проблемам послевоенной энергетики Советского Союза.

Научная сессия МЭИ вызвала большой интерес и привлекла к участию значительное количество представителей научно-исследовательских институтов, высших учебных заведений, центральных учреждений, заводов, электростанций и других предприятий и организаций Москвы. На сессию прибыли также работники учебных заведений, энергоуправлений и заводов Ленинграда, Свердловска, Киева, Харькова, Иванова и других городов. Всего в работе конференции приняло участие около 400 научных и инженерно-технических работников. Работа научной сессии протекала на пленарных заседаниях и в 7 секциях: электроэнергетической, теплоэнергетической, гидроэнергетической, промышленно-теплотехнической, электромеханической, радиотехнической и социально-экономической. Всего на научной сессии было заслушано 77 докладов.

Открывая пленарное заседание научной сессии, директор института инж. В. А. Голубцова в своем кратком вступительном слове охарактеризовала задачи сессии, которая призвана обсудить основные научно-технические вопросы развития послевоенной энергетики СССР.

В докладе проф. Е. А. Руссаковского на тему «Путь развития энергетики СССР после войны», которым открылась сессия, был дан обзор технического перевооружения промышленности на основе электрификации за период сталинских пятилеток. Докладчик подчеркнул, что ведущими звенями развития современной советской техники являются автоматизация, конвейер, комбайн и агрегатный станок. Применение их в массовом и поточном производстве дает возможность использовать преимущества электропривода, автоматизации и механизации производственных процессов, а также позволяет достигнуть ускорения отдельных операций. Проф. Е. А. Руссаковский обрисовал направления дальнейшего развития автоматизации, новые области применения непрерывного автоматизированного потока (горная промышленность) и охарактеризовал перспективы электрификации сельского хозяйства и транспорта.

Содержание доклада подробно изложено в статье автора, напечатанной в журнале «Электричество», № 12, 1945 г.

Инж. Н. Н. Романов выступил с докладом «Энергетика СССР в четвертой пятилетке». Докладчик отметил, что в плане новой послевоенной пятилетки ставятся не только задачи восстановления доведенного уровня, но предусматривается дальнейшее значительное увеличение производительных сил страны. Масштабы задач, стоящих перед советскими энергетиками можно показать на примере восстановления и развития системы Мосэнерго. К началу Великой Отечественной войны система Мосэнерго представляла собой передовую энергетическую систему страны с установленной мощностью до 1,5 млн. кВт. В период войны было выведено из строя свыше 600 тыс. кВт. Энергетикам Москвы необходимо достичь ввода энергетических мощностей с опережением темпа роста промышленной нагрузки, причем нужно считаться с резким возрастанием бытовой нагрузки, уже сейчас превысившей дооцененный уровень, и, в частности, с увеличением нагрузки городского транспорта к концу четвертой пятилетки в два раза.

По системе Мосэнерго намечается ввести в новой пятилетке свыше 1 млн. кВт установленной мощности. Восстановление энергетических мощностей будет сопровождаться модернизацией электрических станций и введением новейших технических достижений. Наряду со строительством новых тепловых станций, базирующихся в основном на подмосковном угле, предусматривается также строительство новых гидроэлектростанций, улучшающих технико-экономические показатели системы Мосэнерго. Будет соружена опытная линия электропередачи постоянным током высокого напряжения Кашира—Москва.

В целом, по Советскому Союзу, предполагается увеличение мощности существующих энергетических систем в два раза и создание ряда новых энергетических систем в Прибалтийских союзных республиках, в Узбекской ССР и др. Энергетические системы Урала и Кузбасса будут объединены. Параллельная работа удаленных энергетических систем Новосибирск—Омск—Урал требует серьезного изучения проблем надежности дальнейшей электропередачи.

В заключение докладчик остановился на некоторых серьезных технических задачах, стоящих перед нашей промышленностью в четвертой пятилетке. 1. В области турбостроения должен быть освоен выпуск турбин высокого давления мощностью 25, 50 и 100 тыс. кВт. 2. Котлостроительные заводы должны улучшить конструкцию и повысить надежность работы и к. п. д. котлов высокого давления барабанного и прямоточного типов. 3. Необходимо освоение производства генераторов с водородным охлаждением. 4. Аппаратуростроительные заводы должны наладить массовый выпуск комплектных распределительных устройств. 5. В области релейной защиты и автоматики должны быть улучшены существующие типы реле и разработаны новые, более совершенные схемы.

Перед учебными заведениями стоит задача подготовки новых кадров: необходимо выпустить несколько тысяч инженеров и несколько десятков тысяч техников.

Доктор физико-математических наук, проф. В. А. Фабрикант посвятил свой доклад «Проблемы физики в энергетике» обзору некоторых вопросов современной физики, связанных с развитием энергетики, и остановился, в частности, на проблеме атомной энергии. Доклад проф. В. А. Фабриканта намечен к опубликованию в виде статьи в одном из ближайших номеров журнала «Электричество».

Электроэнергетическая секция. Работой электроэнергетической секции руководил заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. А. А. Глазунов. Первый доклад в секции был сделан доктором техн. наук, проф. П. С. Ждановым на тему «Перспективы передачи энергии переменным током на большие расстояния». Докладчик изложил современные проблемы передачи энергии переменным током и, подведя итоги, указал, что в настоящее время передача энергии переменным током может быть осуществлена на расстояния до 1 000—1 500 км, однако экономические соображения ограничивают практическую передачу энергии расстоянием порядка 500—600 км.

Основные положения доклада развиты в статье П. С. Жданова, публикуемой в этом номере журнала «Электричество».

Следующий доклад действительного члена Академии наук УССР, доктора техн. наук, проф. С. А. Лебедева был сделан на тему «Автоматическое регули-

рование напряжения в энергосистемах как радикальное средство увеличения статической устойчивости».

Начав с общей характеристики значения для наших современных энергосистем автоматического регулирования напряжения, докладчик указал, что регулированием достигается не столько поддержание напряжения на заданном уровне, сколько повышение надежности работы энергосистемы—сохранение устойчивости параллельной работы и автоматическое поддержание распределения реактивных нагрузок между генераторами. Даже такое простое мероприятие, как форсировка возбуждения генераторов при аварийных понижениях напряжения в системе, в значительной мере способствует сохранению статической устойчивости. Автоматическое регулирование напряжения при работе в области «искусственной устойчивости» обеспечивается электронными регуляторами, например ВЭИ (системы Г. Р. Герценberга). Реостатно-вibrationные регуляторы напряжения завода ХЭМЗ (РН-91) не могут обеспечить работу в области искусственной устойчивости. Вibrationные регуляторы напряжения, имеющие обратную связь от напряжения возбудителя, удовлетворяют условиям работы в области искусственной устойчивости с точки зрения закона регулирования. До сих пор экспериментально не установлено, как далеко можно зайти в область искусственной устойчивости и какие могут быть допущены амплитуды колебания.

Разработанная в СССР система компаундирования синхронных генераторов, с применением твердых выпрямителей (Л. В. Цукерник, К. А. Смирнов) не имеет зоны нечувствительности и по закону регулирования полностью удовлетворяет условиям работы в области искусственной устойчивости. Система не имеет движущихся частей, электронных ламп и тиатронов и весьма надежна в работе.

Кафедрой релейной защиты и автоматики МЭИ был разработан упрощенный электронный регулятор напряжения для компаундированных генераторов (системы И. И. Кодкина, Г. Р. Герценberга), обеспечивающий поддержание постоянства напряжения. Этими качествами не обладает простое компаундирование.

Докладчик отметил также, что задача создания совершенного регулятора напряжения может быть облегчена применением амплидинов.

Доклад проф. П. Г. Грудинского «Некоторые выводы из данных о распределении цветных металлов и потерь в энергетических системах» иллюстрирован большим количеством диапозитивов. Докладчик сообщил интересные результаты обработки статических данных по энергетическим системам за 1943 г., которые показывают распределение цветных металлов по звеням энергосистемы, отнесенное к 1 кВ установленной мощности; генераторы—0,25 т; распределительные устройства—0,29 т; линии и сети 35 и 110 кВ—4,19 т меди и 2,5 т алюминия; сети 0,5—10 кВ—38,19 т; трансформаторы—3,2 т; двигатели—1,5 т и прочие приемники 0,8 т. По тем же данным потери электроэнергии в процентах от всей энергии, выработанной на электростанциях, для сети 22—220 кВ составляют 3,8%; для сети 0,5—10 кВ—8,98%; трансформаторов—6%; двигателей—8,5%; генераторов—4%.

Наибольшие потери и наибольшее количество меди сосредоточены в сетях низкого напряжения. Наиболее верный путь к сокращению потерь электроэнергии и затрат цветных металлов—рассредоточение подстанций, приближение их к нагрузке и повышение напряжения распределительных сетей. Металл, освобождающийся в результате рационализации системы электроснабжения, должен быть вложен в двигатели, трансформаторы и генераторы.

Проф. П. Г. Грудинский указал далее пути к упрощению и увеличению надежности электрических систем. В сетях 110—220 кВ он рекомендует внедрять двухтрансформаторные подстанции и упрощенные схемы коммутации, небольшие трансформаторы—защищать плавкими предохранителями. В сетях 35 кВ, особенно в сетях горной промышленности, сельского хозяйства и городов, должны найти широкое применение комплектные однотрансформаторные подстанции. Сети 10—6 кВ, заводские сети, воздушные сети небольших городов и сельскохозяйственных районов должны получить подсобный ограниченный характер.

После докладов развернулись прения. По докладу доктора техн. наук, проф. П. С. Жданова выступил за-

служенный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. Л. И. Сиротинский, подчеркнувший, что в связи с применением автоматики и благодаря совершенствованию статических конденсаторов последние найдут более широкие перспективы применения для компенсации реактивного сопротивления линий передач. Присоединяясь к докладчику в отношении общих выводов, проф. Л. И. Сиротинский рекомендует в качестве высшего стандартного напряжения переменного тока принять 330 кВ.

В прениях по докладу проф. С. А. Лебедева выступил инженер К. А. Смирнов. Он сообщил, что перед войной только 10—12% всех мощных генераторов имели автоматические регуляторы, на 1 января 1945 г. регуляторы были установлены на 71% всех генераторов, а на 1 января 1946 г.—на 83%.

Доктор технических наук П. С. Жданов и инженер А. Б. Барзам отметили большие достижения советских инженеров в деле разработки новых типов автоматических регуляторов напряжения и оригинального метода компаундирования синхронных генераторов.

Выступивший по докладу проф. П. Г. Грудинского—доктор техн. наук, проф. С. М. Брагин отметил трудности, возникающие в работе энергосистем в связи с нередко наблюдаемой неправильной практикой экономии цветного металла.

На утреннем заседании 25 января были заслушаны доклады заслуженного деятеля науки и техники, доктора техн. наук, проф. Г. Н. Петрова и заслуженного деятеля науки и техники, доктора техн. наук, проф. А. А. Глазунова.

Проф. Г. Н. Петров в докладе «Вопросы трансформаторостроения» отметил, что развитие современного трансформаторостроения определяется совершенствованием конструкций нормальных трансформаторов малой и большой мощности и разработкой конструкций трансформаторов специального исполнения. Первое основное требование, которому должны удовлетворять трансформаторы нормального исполнения, предназначенные для преобразования напряжения в энергосистемах,—максимальная простота, надежность и экономичность конструкций. Это требование, обеспечивающее простоту и низкую стоимость изготовления, выполняется в современных трансформаторах путем применения шихтованной магнитной системы, установкой минимального числа сквозных, прессующих сердечник деталей, отжигом стальных листов после механической обработки, применением винтовых и непрерывных обмоток, механически прочных трубчатых баков и удачным разрешением некоторых других конструктивных узлов.

В современном трансформаторостроении наметились два пути устранения принципиального дефекта, заключающегося в неодинаковом соответствии конструкции обмоток для работы при высокой и низкой частоте: устройство дополнительных электростатических экранов и специальное расположение обмоток. Первый путь получил широкое распространение, однако специальное расположение обмоток по существу является более правильным. Следует расширить область применения естественного охлаждения трансформаторов и вместе с тем обратить особое внимание на повышение надежности и экономичности искусственных систем охлаждения.

Требование обеспечения удобства обслуживания трансформатора в эксплуатации должно пронизывать всю конструкцию трансформатора, от основных его частей до вспомогательных деталей. Здесь предстоит еще большая работа в части совершенствования конструкции трансформаторов. Требование совмещения в конструкции трансформатора функций ряда аппаратов распределительного устройства является особенно характерным для современного трансформатора.

Повышение мобильности, регулирования напряжения под нагрузкой, расщепление обмотки, защита от перенапряжений и перегрузок, непрерывная регенерация масла и конструктивное объединение с распределительным устройством являются актуальными задачами современного трансформаторостроения.

Изключительно большое значение имеют изыскания новых материалов для трансформаторостроения: электротехнической стали, масел и твердых изолирующих материалов. Сталь с пониженными удельными потерями и повышенной индукцией меняет геометрию трансформатора, а увеличение магнитной проницаемости по-новому застав-

ляет смотреть на проблему трансформаторов с синусоидальным намагничивающим током. Анализ экономики послевоенного развития энергосистем показывает, что необходимо провести снижение потерь в трансформаторах по крайней мере на 20—25%: в стали—за счет улучшения ее качества; в меди—за счет понижения плотности тока. Дополнительное вложение металла быстро окупается снижением потерь энергии. Со снижением потерь должно быть понижено тепловое напряжение трансформатора по крайней мере на 10°С. Это повысит надежность и долговечность трансформаторов.

Совершенствование трансформаторов специального назначения—печных, сварочных, сухих, для выпрямительных агрегатов и др. идет по пути сочетания достижений нормального трансформаторостроения с большим разнообразием форм специальных трансформаторов.

Проф. А. А. Глазунов в своем докладе «Экономическое обоснование промежуточных ступеней напряжения» рассказал о проведенной им совместно с инженером С. А. Геликонским работе, в которой были подвергнуты сравнительному анализу три варианта электроснабжения: а) с трансформацией напряжения 110 кВ на напряжение 10 кВ; б) с трансформацией напряжения 110 кВ на напряжение 35 кВ и в) с двойной трансформацией напряжения 110 кВ на напряжение 35 кВ, а затем—на 10 кВ. Низшие напряжения в этих вариантах являются напряжениями потребительских распределительных сетей.

На основе ряда допущений удалось выразить в математической форме зависимость эксплоатационных расходов и капитальных затрат от параметров сети. Было установлено, что независимо от суммарной нагрузки района и плотности ее распределения, наилучшие экономические показатели имеют вариант 110/35 кВ.

Схемы распределения энергии потребителям при напряжении 35 кВ дают уменьшение потерь энергии и расхода цветных металлов, а благодаря уменьшению числа районных подстанций облегчается организация и сокращаются сроки строительства. Экономические выгоды распределения энергии при напряжении 35 кВ могут быть получены как для промышленных, так и для городских воздушных сетей. Заканчивая доклад, проф. А. А. Глазунов предлагает пересмотреть практику распределения энергии потребителям при напряжении 6—10 кВ в сторону повышения напряжения.

В прениях по докладу проф. Г. Н. Петрова выступили доктор техн. наук, проф. Ю. С. Чечет, указавший на чрезмерное занижение сечений обмоток электрических машин, выпускаемых нашими заводами, и инж. С. И. Рабинович, который отметил, что Московскому трансформаторному заводу удалось избежать подобного занижения сечений, и сообщил, что завод в состоянии удовлетворить требованиям электрических систем в отношении увеличения выпуска регулируемых под нагрузкой трансформаторов.

Проф. В. А. Привезенцев подчеркнул, что интересные результаты, сообщенные в докладе проф. А. А. Глазунова, относятся только к воздушным сетям, и выразил сожаление, что допущена недооценка кабельных сетей на заводских территориях.

Проф. А. А. Глазунов в заключительном слове указал, что воздушные линии 35 кВ могут проходить и по заводским территориям при условии соответствующего облегчения опор за исключением некоторых особых условий.

На вечернем заседании 25 января были заслушаны доклады доктора техн. наук, проф. С. М. Брагина и доктора технических наук, проф. А. Я. Буйлова.

Доклад проф. А. Я. Буйлова был посвящен теме «Типы высоковольтных выключателей после войны».

Докладчик сказал, что все многочисленные типы современных высоковольтных выключателей можно разделить в основном на масляные многообъемные выключатели, масляные малообъемные выключатели и безмасляные выключатели; главным представителем последних является выключатель со сжатым газом.

Основные требования, предъявляемые к выключателям: надежность, быстрота действия, возможность быстрого повторного включения, взрыво- и пожаробезопасность, малые веса и габариты и удобство ревизий. Всем этим требованиям удовлетворяет выключатель со сжатым воздухом. Особого внимания заслуживает выключатель со

сжатым воздухом с полыми контактами, по типу которого ВЭИ выполнил модель выключателя на 110 кВ.

Давая оценку малообъемным масляным выключателям, докладчик указал, что этот тип выключателей во многих случаях не может удовлетворить требованию осуществления быстрого, повторного включения, однако по всем остальным показателям он приближается к выключателям со сжатым воздухом. Для некоторых случаев эксплуатации малообъемные масляные выключатели более удобны, чем выключатели со сжатым воздухом; кроме того, они проще и удобнее в производстве. В СССР имеется значительный опыт производства и применения малообъемных выключателей, чего нельзя сказать о выключателях со сжатым воздухом.

Проф. А. Я. Буйлов рекомендовал всячески форсировать исследовательские и конструкторские работы по выключателям со сжатым воздухом, не оставляя работы по совершенствованию малообъемных масляных выключателей. Многообъемные выключатели, не удовлетворяющие большинству требований эксплуатации, нужно снять с производства. Однако, учитывая наличие огромного количества их в эксплуатации, необходимо заниматься разработкой методов их усиления и убыстрения действия.

Доктор техн. наук, проф. С. М. Брагин в начале своего доклада «Высоковольтные кабельные линии» показал фрагменты из учебного кинофильма «Высоковольтный кабель», сценарий и съемки которого выполнены под его руководством.

Проф. С. М. Брагин сообщил, что в настоящее время возможно изготовление надежных подземных и подводных кабелей на напряжение до 380 кВ переменного тока и до 500 кВ постоянного тока. Изучение явлений, происходящих в изолирующем слое кабеля, под влиянием приложенного напряжения дало возможность найти пути для борьбы с понижением электрической прочности и преждевременным пробоем кабеля. Для повышения прочности кабеля нужно или не допускать образования газовых включений в изолирующем слое в процессе производства и в эксплуатации, или же затруднить возникновение ионизации путем применения кабелей с газом при повышенном давлении или с газом повышенной электрической прочности.

Недопущение газовых включений достигается в кабеле маслонаполненного типа путем применения легкоподвижного минерального масла для пропитки изолирующего слоя; этот тип кабеля является наиболее распространенным для рабочих напряжений 100 кВ и выше. Кабели с газом под давлением дешевле и проще в эксплуатации маслонаполненных кабелей. Их можно прокладывать по крутонаклонной и вертикальной трассе, а при прокладке в стальной трубе обеспечивается также надежная защита от механических повреждений.

Соединение преимуществ маслонаполненного кабеля и кабеля с газом достигается в маслостатическом кабеле. Давление масла в стальной трубе повышается до 15 ат при напряжении 100 кВ и выше. Этот тип кабеля, по-видимому, особенно может быть рекомендован для коротких участков высоковольтных кабельных линий.

В заключение проф. С. М. Брагин делает вывод, что развитие отечественной высоковольтной кабельной техники должно основываться на кабелях маслонаполненного типа, как наиболее проверенных в эксплуатации. Следует изготовить кабель с газом под давлением для опытной линии с тем, чтобы можно было точнее определить свойства и область применения этого кабеля по сравнению с маслонаполненным.

В прениях по докладу проф. А. Я. Буйлова выступил инж. А. В. Крикунчик (ТЭП), высказавшийся в пользу скорейшего выпуска нашими заводами выключателей со сжатым воздухом.

Кандидат техн. наук, доц. Г. С. Борчанинов в своем выступлении отметил большие достоинства выключателей с магнитным дутьем, отличающихся простотой конструкции, отсутствием компрессорного хозяйства, безопасностью в отношении взрывов и пожаров, а также тем, что этим выключателям не свойственны перенапряжения при отключении малых токов.

Электромеханическая секция. Работой электромеханической секции руководил доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд.

В докладе доктора техн. наук, проф. Ю. С. Чечета были охарактеризованы «Современные тенден-

ции в электромоторостроении. Прогресс электродвигателестроения по мнению докладчика должен в основном определяться эксплоатационной надежностью и долговечностью машины, высокими к. п. д. и коэффициентом мощности, качеством пусковых рабочих характеристик, малым расходом металла (черного и цветного), разнообразием типов двигателей при рациональной шкале мощностей и простотой изготовления. Почти все поставленные требования взаимно противоречивы, что обуславливает основную трудность конструирования электродвигателей.

Проектирование единых всесоюзных серий электродвигателей проводилось в основном с точки зрения создания «машины минимального веса» без достаточно внимательного отношения к другим требованиям, что привело к повышению плотности тока и магнитной индукции и к ухудшению ряда свойств двигателя.

Анализ общего металловложения в энергосистему показывает, что чрезмерная экономия металла в машине нерациональна, так как приводит к повышенному расходу металла на электростанциях, подстанциях и сетях. Кроме того, ухудшаются эксплоатационные свойства двигателя, повышается его аварийность и сокращается срок службы. Проведенные расчеты показывают, что рациональное уменьшение электромагнитных нагрузок, приводящее к увеличению веса двигателя на 60—80% по сравнению с существующими сериями вполне оправдывается, так как дает возможность получить значительное снижение потерь энергии, уменьшить нагрев двигателей, увеличить надежность и долговечность, повысить к. п. д. и коэффициент мощности при одновременном сохранении прежнего общего количества затраченного цветного металла в энергосистеме и некотором увеличении расхода черного металла. Необходимо пересмотреть ГОСТ 183-41 и 186-41, повысив требования в отношении к. п. д. коэффициента мощности, пускового и минимального моментов, и снизить предельную температуру перегрева электрических машин. Необходимо расширить номенклатуру выпускаемых двигателей.

Следующий доклад был прочитан доктором техн. наук, проф. Б. П. Апаровым на тему «Современное авиац.оное электрооборудование», в котором докладчик охарактеризовал значение применения электропривода на самолете с точки зрения облегчения работы летчика по приведению в движение и обслуживанию разнообразных механизмов современного самолета.

Электромоторное хозяйство современных самолетов доходит до 200 электродвигателей и выше. Применяются самые разнообразные двигатели, преимущественно постоянного тока: шунтовые, серийные, компаундные и даже с постоянными магнитами. Скорость вращения небольших электродвигателей достигает 10 тыс. об/мин и выше. Большинство электродвигателей имеет дистанционное управление. Обычно применяется напряжение 24 В постоянного тока, но изучаются возможности перехода на напряжение 110 В. Большое внимание привлекают проблема трехфазного тока на самолетах и связанные с ней задачи стабилизации напряжения и частоты при различных скоростях вращения авиационного двигателя и задача параллельной работы генераторов. Статья проф. Б. П. Апарова «Основные вопросы электрооборудования современных самолетов» напечатана в журнале «Электричество», № 10, 1945 г.

Доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов в докладе «Электромашиностроение с точки зрения требований, предъявляемых к нему современным автоматизированным электроприводом» познакомил слушателей с результатами проведенных кафедрой электрооборудования промышленных предприятий МЭИ исследований серий электродвигателей, выпускаемых нашими заводами, с точки зрения приспособленности их к режиму повторно-кратковременной нагрузки. Намечены задачи, которые требуется решить в настоящее время в электромашиностроении: построение двигателей, рассчитанных на частое повторное включение, многоскоростных и редукторных двигателей, двигателей с встроенной независимой вентиляцией, двигателей со специальной характеристикой и двигателей постоянного тока с широким регулированием поля, коллекторных двигателей переменного тока малой мощности, а также освоение производства амплидинов.

Необходимо решительно развивать специализированные двигатели, конструктивно сращенные с производственными

механизмами. Необходимо развить построение и применение ионных преобразователей, купроксных и селеновых выпрямителей для управления электроприводами. Следует ввести в практику приводы, комбинированные с редукторами, дифференциалами и др. механизмами.

Доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов в докладе на тему «Новые системы электроприводов для реверсивных исполнительных механизмов» охарактеризовал большое значение амплидина в современной заграничной, в особенности американской, практике. Основной характерной особенностью амплидина является комбинированное назначение его обмотки, которая создает рабочий поток машины и генерирует э. д. с. во внешнюю нагрузочную цепь. Это обеспечивает ряд ценных свойств амплидина при применении в специальных схемах электропривода и в то же время обуславливает ряд недостатков конструктивного и эксплуатационного порядка.

К числу основных недостатков амплидина относятся: сложность конструкции, требующей тщательного изготовления, наладки и ухода в эксплуатации, ухудшенные показатели в отношении нагрева, к. п. д., а также большие габариты по сравнению с машинами нормального типа. К достоинствам амплидина следует отнести малую инерционность переходных процессов и обеспечение управления электроприводом аппаратурой весьма малой мощности.

Амплидин дает возможность внедрить так называемую электромашинную автоматику управления электроприводом, которая обеспечивает любые автоматические характеристики привода, форсирование переходных процессов, регулирование напряжения и регулирование или ограничение тока.

Докладчик ознакомил слушателей с предложенной им системой электропривода для реверсивных исполнительных механизмов с эксплоатационными показателями не худшими, чем показатели системы с амплидина, но при применении электрических машин нормального типа.

Далее были заслушаны доклады кандидата техн. наук, доц. А. Д. Свенчанского и кандидата техн. наук, доц. Ф. Е. Темникова.

Доцент А. Д. Свенчанский в своем докладе «Основные пути развития электротермии» выдвинул ряд требований к отечественной электротехнической промышленности в отношении производства специальных высокотемпературных и жароупорных материалов, электризационных материалов, ферромагнитных материалов с малыми электрическими потерями в полях высокой частоты, специальной аппаратуры управления и аппаратуры автоматической регулировки.

Доцент Ф. Е. Темников в докладе «Автоматика и телемеханика в промышленности» осветил успехи, достигнутые в СССР, в особенности в период Великой Отечественной войны, в области развития автоматики и телемеханики. Сельсины и приборы, подобные им, применяются на самолетах, морских кораблях, в артиллерии и могут быть с успехом применены в промышленности и на электростанциях. Электрические «органы чувств», используемые в настоящее время для испытания самолетов и танков, найдут после войны широкое применение для испытания машин, агрегатов и для эксплуатационного контроля во всех отраслях промышленности.

За время войны существенно усовершенствованы автоматические потенциометры и компенсаторы, являющиеся универсальными приемными приборами: указывающими, сигнализирующими, регулирующими, регистрирующими, интегрирующими и обеспечивающими телеметрические измерения. Новые методы радиосвязи с частотной фазовой и импульсной модуляцией могут применяться и для целей телеметрии при управлении системами большой протяженности.

Успех дальнейших работ зависит от организации приборостроения и от подготовки специальных кадров.

Секция заслушала ряд докладов, посвященных электрификации транспорта. Доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд в докладе «Перспективы технической реконструкции городского электротранспорта городов СССР» выдвинул ряд новых требований к электроснабжающей системе трамваев и троллейбусов. Эти требования определяются, с одной стороны, необходимостью значительного увеличения (по крайней мере в два раза) как плотности сети, так и частоты движения, а с другой стороны, предполагающимся

применением новых, более совершенных типов подвижного состава.

Для решения основных вопросов кафедрой электрической тяги МЭИ было проведено, по заданию Академии коммунального хозяйства, подробное исследование. По произведенным подсчетам повышение напряжения с 550 до 750 В позволяет почти в два раза сократить общее количество меди в сети постоянного тока и в три раза уменьшить расход кабелей при одновременном увеличении, примерно на 25%, мощности подстанционных ртутных выпрямителей с повышением их к. п. д. Постройка нового подвижного состава на напряжение 750 В повысит его быстроту и позволит ему также работать при напряжении 550 В на одних линиях с более тихоходными вагонами. Для питания сети целесообразно перейти с централизованной системы на систему большего числа параллельно работающих подстанций, что обеспечит надежную защиту сетей фидерными выключателями, сократит кабельную сеть, увеличит использование мощности подстанций и сети, уменьшит потери энергии и колебание напряжения в сети, облегчит и удашевит резервирование, упростит схемы и конструкции подстанций в такой степени, что представится возможным разместить их в первых этажах жилых зданий или в небольших киосках типа трансформаторных.

Необходимой предпосылкой для создания подобных подстанций является применение автоматической дистанционно-управляемой аппаратуры с телесигнализацией. В качестве преобразовательных агрегатов следует переходить для малых и средних мощностей на залаянные воздушноохлаждаемые выпрямители, требующие меньшей кубатуры и упрощающие автоматизацию.

Существенное значение с точки зрения упрощения подстанций, облегчения их монтажа и улучшения эксплуатации имеют комплектные распределительные устройства. Перевод защиты и автоматики подстанций на переменный ток позволит освободиться от аккумуляторных батарей и зарядных устройств.

При реконструкции контактной сети должно быть обращено внимание на увязку работы подвески и токоприемника, простоту и надежность крепления, улучшение и упрощение конструкции отдельных частей. Следует полагать, что во многих случаях, особенно на загородных линиях, окажется целесообразным применение цепной подвески контактной сети.

Доктор техн. наук, проф. Д. К. Минов посвятил свой доклад «Перспективам технической реконструкции электротранспорта городов СССР в области электроподвижного состава».

По заданию Управления московского трамвая кафедра электролокомотивостроения МЭИ выполнила в 1944 г. работу по подбору основных параметров нового трамвайного вагона для Москвы. Докладчик считает рациональным следующим образом использовать основные виды городского электротранспорта: метро — для связи между дальними районами, трамвай — для связи между ближними районами, внутри районов и с ближними пригородами, троллейбус — для обслуживания более узких улиц. Основным видом городского электротранспорта все еще остается трамвай. В 1943 г. трамваем было перевезено 64,5%, метро — 26,0%, троллейбусом — 9,5% пассажиров.

Современный трамвайный вагон должен иметь конструктивную скорость около 70 км/ч для работы на загородных линиях. В черте города скорость ограничивается требованиями безопасности уличного движения 40—45 км/ч. Повышение скорости связано с повышением ускорения при пуске и замедления — при торможении. Для возможности реализации высоких замедлений необходимо иметь мощные и надежные тормоза: воздушный, электродинамический (не вызывающий явлений юза), рельсовый, электромагнитный (не зависящий от величины сцепного веса вагона).

Система управления должна автоматически поддерживать заданный режим ускорения при разгоне или замедления при торможении и обеспечивать быстрый переход на эти режимы с выбегом, что может быть осуществлено с помощью схемы «плавающего режима» при автоматически регулируемой системе.

Для снижения эксплуатационных расходов прежде всего необходимо снизить вес вагона, применив для этой цели быстротходные тяговые двигатели. Компаундный дви-

гатель имеет преимущества перед серийным в отношении малого расхода энергии. Для устранения шума в трамвайных вагонах следует отказаться от листовых рессор и широко применять резину, реконструировать боксовой узел и перейти на карданный привод с гипоидной передачей.

В противоположность трамвайному подвижному составу советские троллейбусы имеют достаточно современное выполнение и поэтому не требуют серьезной реконструкции. Целесообразно лишь перейти на регулируемое автоматическое управление.

По докладу проф. В. Е. Розенфельда и проф. Д. К. Минова развернулись прения.

Инж. Ю. М. Галоин остановился на комплексе вопросов, связанных с экономией электроэнергии: использовании тепла, выделяемого электродвигателями для отопления вагонов при помощи рациональной вентиляции; внедрении безреостатного пуска (в пусковых реостатах трамваев только гор. Москвы непроизводительно затрачивается свыше 600 000 kWh электроэнергии в год); правильном учете электроэнергии, расходуемой трамваями и троллейбусами.

Кандидат техн. наук, А. Б. Иоффе указал, что завод «Динамо» может обеспечить выпуск современных типов тяговых двигателей для трамваев и освоить новый тип для короткой карданной передачи с системой зубчатого зацепления Бриль, что даст возможность снизить вес электрооборудования трамвайного вагона на 2 т.

Кроме того, в прениях выступили: канд. техн. наук Г. Г. Марквардт, инж. Л. А. Вислоух, инж. В. Г. Шапошников, кандидат техн. наук Б. П. Петров и кандидат техн. наук С. М. Мессерман.

Вечером того же дня инж. А. Д. Степанов доложил «О роли тепловоза в развитии железнодорожного транспорта».

Кафедра электролокомотивостроения ведет большую работу по выяснению роли и значения тепловозной тяги для развития и реконструкции железнодорожного транспорта и неоднократно ставила вопрос о необходимости немедленного развертывания тепловозостроения в СССР. Сравнение паровозной, тепловозной и электрической тяги по технико-экономическим показателям указывает на существенные преимущества тепловоза: к. п. д. тепловозов составляет 27—29% против 5—7% паровоза и 14—15% для магистрального электровоза и соответственно — 22%, 1,5%—2% и 10% — для условий маневровой работы в промышленном транспорте. Коэффициент использования рабочего времени тепловоза составляет 90—95%, электровоза — 95%, паровоза — 50—60%. Вес тепловоза меньше веса паровоза с тендером, но больше веса электровоза. Стоимость самого тепловоза больше, чем паровоза и электровоза, однако общая стоимость первоначальных затрат значительно ниже, чем при электрической тяге, и в ряде случаев ниже, чем при паровозной тяге. Стоимость эксплуатации тепловозной тяги ниже, чем паровозной и сравнима с электровозной.

Недостатками тепловозов являются: потребление нефти, более сложное оборудование, чем паровозов, и низкая перегруженная способность. Докладчик намечает следующие области преимущественного применения различных видов локомотивной тяги. Электрическая тяга — основные магистрали в промышленных районах с большими грузопотоками, пригородное пассажирское движение; крупные промышленные предприятия с мало разветвленной железнодорожной сетью. Тепловозы — маневровая работа на железнодорожных узлах, промышленные предприятия с разветвленной железнодорожной сетью, товарное и пассажирское движение в безводных и нефтеносных районах и районах, удаленных от угольных месторождений, быстроходное пассажирское сообщение между крупными центрами. Паровозы — товарное и пассажирское сообщение в районах, близких к угольным месторождениям.

Заключительным докладом в работе секции был доклад доцента П. В. Сахарова на тему «Современная низковольтная аппаратура», в котором он сообщил о задачах электропромышленности в разработке и освоении новых типов низковольтного оборудования и, в частности, комплектных распределительных устройств.

В развернувшихся по всем докладам прениях выступающие отмечали правильность основных положений и задач, сформулированных докладчиками. Состоявшимся за-

тем объединенным заседанием электротехнических секций руководил доктор техн. наук, проф. С. М. Брагин.

С большим интересом был заслушан доклад, представленный членом-корреспондентом Академии наук СССР, доктором техн. наук, проф. К. А. Кругом «Перспективы развития передачи энергии и посторонним током». В докладе охарактеризованы преимущества передачи энергии постоянным током и отмечены затруднения и недостатки, встречающиеся на пути к ее осуществлению. Доклад опубликован на страницах журнала «Электричество» (№ 3, 1946).

В прениях по докладу выступили кандидат техн. наук Я. М. Червоненкис и доктор техн. наук, проф. Д. К. Минов.

Во втором докладе доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов осветил вопросы «Развития преобразовательной техники и связи ее с проблемами энергетики». Докладчик отметил, что проблема передачи энергии постоянным током тесно связана с созданием высоковольтных преобразователей, выпрямителей и инверторов, и охарактеризовал современное состояние вопроса («Электричество», № 1, 1946).

Проф. И. Л. Каганов указал также области электротехники, развитие которых получило мощный толчок благодаря использованию достижений преобразовательной техники: установки для преобразования частоты, электрические приводы с широкими пределами регулировки скорости вращения, регулировка возбуждения синхронных генераторов.

Советские ученые создали новые ионные приборы, обладающие рядом достоинств: ионный генератор проф. В. Л. Грановского и кандидата техн. наук Т. А. Суэтиня и тригетрон проф. Б. Н. Клярфельда.

27 января были заслушаны три доклада. В первом докладе — «Электротехнические сплавы» доктор техн. наук, проф. А. С. Займовский познакомил слушателей с технической характеристикой новых магнитных, проводниковых, реостатных, контактных, электровакуумных и приборостроительных сплавов и наметил задачи, стоящие в этой области перед научно-исследовательскими институтами и промышленностью.

Кандидат техн. наук, доц. А. В. Талицкий широко иллюстрировал свой доклад «Современное электроприборостроение» новыми отечественными и заграничными приборами.

Последний доклад на объединенном заседании секций сделан доктором техн. наук, проф. В. В. Мешковым и посвящен теме «Флюоресцентные лампы и их применение в осветительной технике». Докладчик подробно изложил преимущества флюоресцентных ламп перед лампами накаливания. Существующие недостатки флюоресцентных ламп постепенно устраняются и область применения их расширяется.

Теплоэнергетическая секция работала под руководством проф. Л. И. Кацелли.

На секции был заслушан доклад проф. Л. К. Рамзина «Рациональные пути энергостроительства и профиль электростанций СССР». В этом же заседании был заслушан доклад доцента С. Ц. Фаермана «Краткий обзор энергетического хозяйства США». В вечернем заседании того же дня был заслушан доклад доцента М. М. Пешковой «Опыт проектирования упрощенных компоновок топливоподачи и пылеприготовления электрических станций». Проф. М. А. Стырикович сделал доклад на тему «Перспективы котлостроения». Были заслушаны также доклады проф. Н. Г. Пашукова «Сравнительная характеристика водных режимов барабанных и прямоточных котлов» и проф. С. Г. Герасимова «Роль автоматизации на электростанциях в послевоенное время».

На объединенном заседании секций теплоэнергетической и промышленной энергетики был заслушан доклад акад. М. В. Кирпичева «Перспективы повыше-

ния коэффициента полезного действия тепловых машин».

В прениях по докладам выступали профессора и доценты МЭИ и ведущие научные работники и инженеры-теплотехники научно-исследовательских институтов и электростанций.

Гидроэнергетическая секция работала под руководством доктора техн. наук, проф. Т. Л. Золотарева. Всего было сделано 11 докладов. Наибольший интерес с общеэнергетической точки зрения представляют: доклад доктора техн. наук, проф. Т. Л. Золотарева «Лаборатория гидроэнергетики МЭИ», в котором докладчик рассказал о комплексе новых лабораторий гидроэнергетики; доклад инж. И. М. Соколова «Вопросы исследования эффективности использования гидроэлектростанций»; доклад кандидата техн. наук, доц. Д. О. Сейфулла «Эффективный режим работы гидроэнергетического оборудования гидроэлектрических станций»; доклад доктора техн. наук В. Г. Аивазяна «Основные положения энерго-экономических расчетов при проектировании гидростанций».

Остальные доклады: инж. Б. К. Александрова «Путей упрощения и ускорения строительства крупных речных низконапорных гидроэлектрических станций», профессора Ф. Ф. Губина «Технико-экономические исследования при гидроэлектро строительстве» и др. носили более специальный гидротехнический характер.

Радиотехническая секция работала под руководством проф. Г. А. Левина. Было заслушано 13 докладов, большинство из которых имело узко специальный характер. Из докладов, представляющих более широкий интерес, можно отметить доклады проф. А. Н. Казанцева «Исследование ионосферы во время солнечного затмения 9-го июля 1946 г.» и «Расчет поглощения радиоволн в ионизированных слоях атмосферы», а также доклад доц. Б. Б. Пестрякова «Современные проблемы радионавигации».

Работы конференции закончились заключительным пленарным заседанием. Заседание открылось докладом директора МЭИ инж. В. А. Голубцовой на тему «Вопросы подготовки инженерных кадров для энергетики».

Основные положения доклада В. А. Голубцовой развиты в ее статье, публикуемой в этом номере журнала «Электричество».

После доклада В. А. Голубцовой партторг ЦК ВКП(б) в МЭИ доц. В. А. Кириллин сделал доклад «Об организации политического воспитания студентов».

В заключение состоялся доклад доктора техн. наук, проф. Л. Д. Белькина «О роли русских техников в мировой энергетике».

Докладчик указал на высокий уровень ремесел, прикладного искусства и техники Киевской Руси и отметил, что Монгольское нашествие задержало технический прогресс страны по крайней мере на триста лет. Он сказал, что в XVI—XVIII веках в России было много людей, владевших техническими знаниями и высоким мастерством: рудознатцы, литеящики, механики и т. п. Затем проф. Л. Д. Белькин подробно остановился на работах русских электротехников и теплотехников и охарактеризовал их мировое значение.

Докладчик особо остановился на работах Петрова, Ленца, Якоби, Яблочкива, Лодыгина, Попова, Доливо-Добровольского, Шпаковского, выдающегося разностороннего инженера Шухова, великих русских химиков Воскресенского, Бутлерова, Менделеева и др.

Кандидат техн. наук, доц. Г. С. БОРЧАНИНОВ

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

Конференция по электроприводу прокатных станов

Большие и ответственные задачи поставлены товарищем Сталиным перед советскими металлургами в речи 9 февраля 1946 г. Под знаком осуществления этих задач проходила 28 февраля 1946 г. однодневная конференция по вопросам электропривода и автоматики прокатных станов, организованная Научно-техническим обществом и кафедрой электрооборудования промышленных предприятий МЭИ.

В работе конференции, кроме работников МЭИ, приняли участие представители ведущих научно-исследовательских организаций — Всесоюзного электротехнического института, центральных научно-исследовательских институтов тяжелого машиностроения и черной металлургии, Института автоматики и телемеханики Академии наук СССР, проектных организаций — Центроэлектромонтажа и проектно-восстановительного треста, завода «Серп и Молот» и других. Всего на конференции присутствовало 80 человек. Конференция заслушала 6 докладов.

Начальник электроотдела Центрального научно-исследовательского института тяжелого машиностроения инж. А. Е. Гуревич сделал доклад: «Состояние и задачи в области реверсивных прокатных станов и их электроприводов». Докладчик отметил, что для обеспечения ежегодного выпуска 60 млн. тонн стали необходимо вновь изготовить и ввести в эксплуатацию 30—40 механизированных блюмингов и толсто-листовых станов. При таком объеме работ по реверсивным станам, в несколько раз превышающем объем за первые три пятилетки, совершенно необходимо подвергнуть коренному пересмотру электропривод и автоматизацию металлургических агрегатов и учесть опыт, накопленный нашими заводами, и новости заграничной техники. Вновь необходимо рассмотреть вопрос о типе привода (групповой, двухякорный, индивидуальный привод), целесообразно разработать тип двигателей главного привода.

Неменьшую важность представляет усовершенствование схемы автоматического управления. Подлежат глубокому экспериментальному и теоретическому изучению установки с электромашинной автоматикой (амплидин, регулекс) и должна быть создана новая схема управления. Следует продолжить работы по комплексной автоматизации главного привода с основными вспомогательными механизмами. На более высокую ступень необходимо поставить методы электрических измерений технологических и производственных величин.

Профессор Д. П. Морозов и доцент В. П. Бычков (МЭИ) сделали доклад на тему: «Основные положения и сравнение контакторно-релейных и электромашинных схем управления». В докладе отмечаются высокие качества схемы контакторно-релейной автоматики, разработанной GEC и усовершенствованной ХЭМЗ. Современные схемы автоматического управления с применением в них электромашинной автоматики являются дальнейшим и очень крупным шагом вперед в отношении увеличения производительности и сокращения расхода электроэнергии. Опыт GEC следует считать удачным. Это подтверждается также и тем, что и другие американские фирмы пошли по тому пути. Фирма Allis Chalmers разработала схему с регулексами. В последнее время фирма Westinghouse предложила новую схему, в которой основные функции управления осуществляются специальным вспомогательным генератором — ротором. В докладе дано подробное технико-экономическое сопоставление показателей по основным схемам управления.

В заключительной части доклада отмечена необходимость значительного расширения объема экспериментальных и теоретических исследований как в условиях заводов-изготовителей и научно-исследовательских институтов, так и в условиях эксплуатации. Это обеспечит дальнейшее творческое и самостоятельное развитие и успешное выполнение задач, поставленных перед металлургами.

Кандидат техн. наук М. В. Мееров (ВЭИ) изложил содержание теоретических работ по схеме управления реверсивным станом с амплидином и результаты экспериментальных работ на макете установки в лаборатории Всесоюзного электротехнического института. Исследование производилось как в отношении установления параметров для получения наилучшее жалательных эксплоатационных характеристик, так и в отношении выявления условий регулирования, при исходном положении, что данная схема является замкнутой системой регулирования статического типа. Автор изложил основные выводы в отношении величины и продолжительности форсирования и условий апериодического процесса регулирования и иллюстрировал их экспериментальными материалами и осциллограммами.

Кандидат техн. наук, доцент Н. П. Куницкий доложил о готовности к пуску (май 1946 г.) в Центральном научно-исследовательском институте черной металлургии экспериментального реверсивного стана. Универсальный стан может работать, как «дво», «трио» и «кварто», путем смены валков. Главный двигатель имеет мощность 475 л. с., 150/300 об/мин, 220 V. Управление по системе Леонарда с амплидинами. Установка предназначается для проведения экспериментальных работ как по прокатке, так и по электроприводу.

В дальнейшем предусматривается питание электродвигателя от регулируемого ртутного выпрямителя. Последний изготовлен ВЭИ и находится сейчас в монтаже.

Инж. Н. А. Тищенко и инж. Н. М. Филин (Проектно-восстановительный трест) выступили с докладом «Электропривод реверсивных прокатных станов». В докладе отмечается, что блюминг и его электропривод советского производства по своим показателям стоят на уровне американских, а в некоторой части превосходят.

Дальнейшее повышение производительности требует улучшения внешней моментной характеристики двигателя и уменьшения его махового момента, чему препятствует предел по напряжению между коллекторными пластинами и предел по коммутации. В качестве мероприятия, повышающего указанные пределы, авторы доклада указывали возможность применения двухходовой обмотки якоря и иллюстрировали доклад результатами расчетов и сравнительных выводов.

Во второй части доклада была рассмотрена целесообразность реконструкции способа управления переходными режимами двигателя, причем предлагалось перейти к управлению напряжением генератора вплоть до высоких скоростей двигателя. Это упростит схему, уменьшит время пуска и реверса и обусловит большую равномерность протекания переходных режимов.

Все основные положения доклада были иллюстрированы расчетными материалами и графиками.

Инж. Н. Н. Стефанович (Центрэлектромонтаж) в своем докладе «Выбор параметров цепей возбуждения машин главного привода реверсивных прокатных станов» изложил основные положения расчета номинальных данных амплидина, возбудителя и возбуждения главного генератора. Расчетные формулы составлены на основании анализа условий наиболее оптимального режима пуска и иллюстрированы примерным расчетом для конкретной установки.

Заслушанные доклады вызвали по ряду вопросов оживленный обмен мнениями.

В прениях приняли участие И. Л. Людмирский, М. М. Браголь, А. И. Шейнман, Б. А. Левитанский, Е. Л. Этингер, А. Б. Челюскин, Е. В. Нитусов, Ф. А. Горянинов, авторы докладов и др.

Доктор техн. наук, проф. Д. П. МОРОЗОВ

В Комиссии по истории физико-математических наук Академии наук СССР

О работах Б. С. Якоби в области электросвязи

В январе 1946 г. в Ленинграде под председательством академика С. И. Вавилова состоялось заседание Комиссии по истории физико-математических наук. В числе других вопросов был рассмотрен план работы профессора Д. И. Каргина над темой: «Б. С. Якоби — пионер электросвязи в России». План этот одобрен в следующем виде:

1. Состояние и роль телеграфной связи в России и за границей в первой половине XIX столетия.

2. Политические и общественные интересы, интересы торговли и транспорта и другие обстоятельства, вызывающие необходимость введения в России усовершенствованных средств связи.

3. Первоначальные опыты Шиллинга.

4. Научные исследования Якоби в области электричества, имеющие отношение к вопросам телеграфии.

5. Роль Якоби в развитии практической электросвязи.

6. Судьба практических опытов Якоби по телеграфии.

7. Значение работ Якоби.

На следующем заседании Комиссии был заслушан доклад профессора Д. С. Пашенцева о его работе над научным наследием Б. С. Якоби в области телеграфии. Краткое содержание доклада приводится ниже.

Возникновение и развитие телеграфии тесно связано с такими выдающимися деятелями, как Шиллинг, Якоби, Морзе, Бодо, Юз, Уитстон и др. Однако в литературе, посвященной этому вопросу, имя академика Б. С. Якоби остается в темноте. Между тем работы Б. С. Якоби в области телеграфии представляют огромный интерес не только с точки зрения исторической, но и потому, что они определяют ведущую роль русской научной мысли в деле установления теоретических основ телеграфии и ее практического осуществления.

Автору доклада удалось ознакомиться лишь с частью исторических материалов, касающихся работ академика Б. С. Якоби в области телеграфии, но уже на основании этих материалов без преувеличения можно сделать выводы о том, что Б. С. Якоби является не только создателем первых электромагнитных телеграфных аппаратов, но и одним из крупнейших основоположников теории и практики телеграфии.

Б. С. Якоби был хорошо осведомлен о всех работах, которые велись в области телеграфии не только в России, но и за границей. В своей работе по телеграфии он, однако, был далек от компиляции, от повторения идей и разработок своих современников: Шиллинга, Морзе, Штейнгеля, Зоммеринга и пр.

Никто, как Б. С. Якоби, не ставит так широко и глубоко вопрос о значении телеграфа для практических целей, о требозаниях, которые должны лечь в основу его построения. В критическом анализе, который Б. С. Якоби дает современным ему устройствам телеграфа, он отмечает все их недовершенства и малопригодность для практических целей. Одновременно на основе глубокого анализа Б. С. Якоби выдвигает основные положения, которые должны лечь в основу построения телеграфа, понимая под этим не только телеграфный аппарат, но и линейные устройства.

В течение 7 лет Б. С. Якоби непрерывно ведет напряженную работу над созданием усовершенствованного телеграфного аппарата, отвечающего техническим и эксплуатационным требованиям. Основными требованиями, которые руководили Б. С. Якоби в этой работе, были: а) приближение языка телеграфии к разговорному языку; б) установление наиболее совершенного и несложного кода; в) фиксирование принимаемых телеграфных сигналов; г) буквопечатающий прием; д) звуковой прием телеграфных сигналов; е) чувствительность приемного устройства; ж) скорость и дальность телеграфной передачи; з) возможность упрощения конструкции аппарата.

Работая над созданием совершенного телеграфного аппарата, Б. С. Якоби вместе с тем упорно работал над изучением линии, связывающей корреспондирующие пункты. Экспериментируя с линиями, несовершенно изолированными, Б. С. Якоби встретился с вопросами неустойчивости работы телеграфных аппаратов. С присущей ему настойчивостью и энергией он изыскивал меры к борьбе с этой неустойчивостью в целях создания условий для увеличения дальности телеграфирования. В этом отношении заслуживают внимания попытки Б. С. Якоби создать высокозализированную подземную линию (применение стекла, каучука для изоляции медных проводников и создание противобатарей для уничтожения обратных зарядов в проводе).

Особенно замечательной работой Б. С. Якоби в вопросе осуществления дальней телеграфной связи является создание и применение на линии трансляции для автоматического приема телеграфных сигналов.

Основываясь на широком экспериментальном анализе и прида к идее устройства таких трансляций, Б. С. Якоби практически осуществил такую установку на линии С.-Петербург—Царское Село. Эта работа имеет большое значение.

Среди многочисленных работ Б. С. Якоби в области телеграфии следует отметить также использование земли в качестве обратного провода, что дало возможность применения однопроводной цепи в телеграфной связи.

В условиях, крайне неблагоприятных и в смысле материальных средств и в смысле отсутствия какой-либо технической помощи или компетентного совета, и лишь благодаря своему выдающемуся таланту, а также самоотверженному служению русской науке Б. С. Якоби добился успешных результатов своей работы.

В течение семи лет Б. С. Якоби создал семь типов телеграфных аппаратов: 1) две телеграфические машины с зигзагообразной записью; 2) два телеграфных электрохимических аппаратов; 3) два телеграфных аппарата с синхронным вращением; 4) два стрелочных телеграфных аппарата; 5) два физиологических телеграфных аппарата; 6) два телеграфных аппарата со звонком; 7) два акустических телеграфных аппарата.

Эта огромная работа в совокупности с работами по линейным устройствам, а также теоретическими и экспериментальными исследованиями дает основание считать академика Б. С. Якоби одним из крупнейших основоположников в деле создания телеграфной связи.

М. И. РАДОВСКИЙ

Чествование проф. М. А. Шателена в связи с его 80-летием

В конце января с. г. научно-техническая общественность Москвы проводила чествование одного из старейших электротехников СССР, заслуженного деятеля науки и техники, члена-корреспондента АН СССР проф. Михаила Андреевича Шателена в связи с его 80-летием. Торжественное заседание состоялось в Отделении технических наук Академии наук СССР под председательством вице-президента АН СССР Героя Социалистического труда академика И. П. Бардина, который во вступительном слове отметил большие заслуги М. А. Шателена, как ученого и общественного деятеля.

Имя М. А. Шателена, сказал академик И. П. Бардин, тесным образом связано в течение более полувека со всем развитием электротехники и электростроительства в нашей стране. Старейший профессор электротехники в русской высшей школе, современник пионеров практического применения электричества в России — Яблочкива, Лодыгина, Попова, Доливо-Добровольского, руководитель и организатор первых лабораторий высокого напряжения, электрических измерений, фотометрии, постоянный представитель нашей страны в международных метрологических организациях и на электрических конгрессах, выдающийся участник составления первого плана электрификации — ГОЭЛРО, один из основателей Энергетического института АН СССР, — Михаил Андреевич Шателен заслужил своими научными трудами, творческой инициативой и плодотворной общественной деятельностью широкое признание. Настоящее торжественное заседание является выражением этого широкого признания больших заслуг Михаила Андреевича, как ученого и общественного деятеля и его высоких качеств горячего патриота нашей родины и человека.

В президиум торжественного заседания были избраны: академики С. И. Вавилов, И. П. Бардин, Н. Г. Бруевич, Е. А. Введенский, Б. Н. Юрьев, Г. М. Кржижановский, В. Ф. Миткевич, А. В. Винтер, Б. Е. Веденеев, К. И. Шенффер, В. С. Кулебакин, А. А. Байков, С. С. Наметкин, А. М. Терпигорьев, А. А. Скочинский, Е. А. Чудаков, В. Н. Образцов; члены-корр. А. Н. СССР И. И. Артоболевский, В. И. Вейц, А. И. Берг, К. А. Круг, В. И. Коваленков, Н. Г. Четаев; зам. председателя ВКВШ А. Я. Синецкий, председатель Комитета по делам мер и измерительных приборов А. П. Кузнецов, директор Ленинградского политехнического института им. Калинина проф. П. Л. Калантаров, директор Московского энергетического института им. Молотова В. А. Голубцова, зам. директора МЭИ проф. Г. Н. Петров, председатель МОНITOЭ проф. Б. А. Телешев, отв. секретарь редакции журнала «Электричество» Я. А. Климовицкий и отв. секретарь юбилейного комитета проф. В. П. Иванов.

В своем докладе о научной и общественной деятельности М. А. Шателена академик В. Ф. Миткевич осветил роль и значение трудов юбиляра в развитии русской научной электротехнической мысли, а также в развитии электрификации СССР. В. Ф. Миткевич особо подчеркнул значение работ М. А. Шателена в области широкого применения высоких напряжений в электроэнергетике СССР.

«Нет ни одной крупной электропередачи в СССР, при проектировании и осуществлении которой в той или иной форме не отразились бы труды М. А. и его прогрессив-

ные идеи, касающиеся высоковольтных линий. Заслуги М. А. в области высоких напряжений нашли свое признание и за границей: в 1933 г. он был избран в Париже членом Совета международных конференций по сетям высоких напряжений и вице-президентом названных конференций».

Далее докладчик охарактеризовал работы М. А. Шателена как одного из выдающихся участников составления первого плана электрификации — ГОЭЛРО, плана, получившего высокую оценку В. И. Ленина и И. В. Сталина, а также обрисовал деятельность юбиляра в дальнейшем развитии различных отраслей электрификации, электротехники, а также метрологии в СССР (подробная статья В. Ф. Миткевича и Н. А. Шостынина к 80-летию М. А. Шателена помещена в журнале «Электричество», № 1, 1946).

Академик А. В. Винтер в своем докладе поделился воспоминаниями о встречах с М. А. Шателеном и совместной многолетней работе в области электростроительства.

Далее были оглашены приветствия М. А. Шателену от президента Академии наук СССР, академика С. И. Вавилова, от президиума Академии наук СССР, от Наркомата электростанций СССР, от Наркомата электропромышленности СССР и от Совета по радиолокации.

С приветствиями юбиляру выступили: от Отделения технических наук АН СССР академик — секретарь ОТН Б. А. Введенский; от Отделения физико-математических наук АН СССР — академик Н. Н. Лузин; от Энергетического института АН СССР академик Г. М. Кржижановский; от Всесоюзного Комитета по делам высшей школы — А. Я. Синецкий; от Ленинградского политехнического института им. Калинина — директор института, доктор техн. наук, проф. П. Л. Калантаров; от Московского энергетического института им. Молотова — зам. директора института, доктор техн. наук, проф. Г. Н. Петров; от Комитета по делам мер и измерительных приборов — председатель Комитета А. П. Кузнецов; от Киевского политехнического института — проф. А. В. Орловский; от общества МОНITOЭ — председатель общества проф. Б. А. Телешев; сын известного русского изобретателя электротехники Н. Г. Славянова — проф. Н. Н. Славянов; от Московского электролампового завода — кандидат техн. наук Р. Г. Извеков и др. Член-корреспондент АН СССР В. И. Вейц зачитал большой список поступивших на имя М. А. Шателена приветствий, среди которых приветствия — от академика П. Л. Капицы, от редакции журнала «Электричество», от Госэнергоиздата, от многочисленных высших учебных заведений и научных институтов, заводов электропромышленности и отдельных лиц.

С ответом на приветствия выступил член-корреспондент АН СССР Михаил Андреевич Шателен, который тепло поблагодарил большую аудиторию торжественного заседания и всех выступавших за адресованные ему приветствия и пожелания.

В заключение торжественного заседания состоялся большой концерт. К заседанию Госэнергоиздатом была выпущена брошюра, посвященная жизни и деятельности М. А. Шателена в связи с его 80-летием — очерк Н. А. Шостынина под редакцией академика В. Ф. Миткевича.

К 75-летию проф. Н. А. Артемьева

Среди старейших русских электротехников почетное место занимает проф. Николай Андреевич Артемьев. Электротехническая общественность отмечает 75-летие со дня его рождения и 50-летие его научной и педагогической деятельности.

Николай Андреевич родился в Москве в 1870 г. В 1895 г. он окончил с отличием Московское высшее техническое училище (МВТУ) со званием инженера-механика. Будучи командирован за границу для усовершенствования в науках, Николай Андреевич в продолжение двух лет работал в Шарлоттенбургском политехникуме.

По возвращении из-за границы Николай Андреевич поступил на электротехнический завод в Петербурге, где в 1899 г. по его расчету производилось проектирование и изготовление трехфазных асинхронных двигателей мощностью в $1\frac{1}{2}$ и $3\frac{1}{2}$ л. с., оказавшихся по весу на 35% легче тех, которые изготавливались тогда на заводе.

В 1900 г. Н. А. Артемьев был избран профессором Киевского политехнического института, где в течение 11 лет и протекала его дальнейшая научная и педагогическая деятельность. В стенах Киевского политехнического института им была организована одна из первых тогда в России лабораторий высокого напряжения на 100 000 V. Здесь он защитил свою докторскую диссертацию на тему: «Определение размеров динамомашин и влияние напряжения на размеры машин», после чего был утвержден ординарным профессором по электротехнике. В Киевском политехническом институте Н. А. Артемьев читал лекции по общей электротехнике, по центральным электрическим станциям и сетям и руководил дипломным проектированием.

В 1907 г. он вместе с несколькими специалистами основал Южнорусское общество электротехников и был его первым председателем. В 1908—1910 гг. Николай Андреевич принимал деятельное участие в организованном союзом металллистов в г. Киеве обществе по распространению образования среди рабочих. Сначала он был лектором, а затем стал председателем этого общества.

С 1911 г. в течение 4 лет Николай Андреевич работал в качестве главного инженера Харьковского городского управления, где под его руководством была спроектирована и построена новая электрическая станция и расширена электрическая городская сеть. Одновременно Николай Андреевич был экспертом по электростроительству в других крупных городах России (Баку, Казань, Астрахань, Полтава, Тифлис, Славянск). Переходя в конце

1915 г. на работу в Петроградское городское управление, Николай Андреевич взял на себя руководство работой по объединению нескольких работавших тогда в городе электростанций в одну общую систему.

После Великой Октябрьской социалистической революции Н. А. Артемьев с еще большей энергией отдаётся любимому им делу — развитию в СССР инженерного электротехнического образования. Когда в 1920 г. при Московской сельскохозяйственной академии им. Тимирязева была открыта кафедра по электротехнике, Николай Андреевич был избран профессором этой кафедры. С тех пор Николай Андреевич тесно связал свою деятельность с электрификацией сельского хозяйства СССР. Первые в Союзе научно-исследовательские лаборатории по внедрению электричества в сельское хозяйство были созданы Николаем Андреевичем при сельскохозяйственной академии им. Тимирязева, а затем во вновь организованном Всесоюзном научно-исследовательском институте по электрификации сельского хозяйства.

Из числа оригинальных изобретений и технических достижений, принадлежащих Николаю Андреевичу, необходимо упомянуть следующее: защитный костюм для работы под высоким напряжением; электростатический телефон; синхронизатор для коротких импульсов; катящийся непрерывный контакт для компенсационного аппарата; электрический способ закалки пил и др.

Опубликованные работы Н. А. Артемьева по расчету электрических машин (1904 г.), по технике и экономике электропроизводства (1922 г.), по проблеме воздействия электрического сетевого излучения и электрического тихого разряда на рост растений (1935 г.) и ряд других работ способствовали развитию научной мысли в этих областях.

В настоящее время Николай Андреевич с большой энергией продолжает свои научные работы. Под его руководством при Тимирязевской сельскохозяйственной академии создается сейчас лаборатория искусственного климата, оборудованная новейшей электротехнической аппаратурой. Одновременно Николай Андреевич работает в качестве научного консультанта Всесоюзного института механизации и электрификации сельского хозяйства.

Пожелаем же нашему юбиляру здоровья еще на многие годы и дальнейшей плодотворной работы на благо нашей социалистической Родины.

Академик К. И. ШЕНФЕР



Государственные общесоюзные стандарты (ГОСТ) в области электротехники¹

ПРАВИЛА И НОРМЫ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

- ГОСТ 1494-42. Электротехника. Обозначения основных величин (буквенные). Взамен ОСТ/ВКС 5579, ОСТ/ВКС 5580 и ОСТ 40200.
- ГОСТ 1410-42. Диэлектрики твердые. Определение электрической прочности.
- ГОСТ 1516-42. Напряжения испытательные и разрядные высоковольтных трансформаторов, аппаратов и изоляторов, предназначенных для установок, связанных с воздушными сетями.
- ГОСТ 721-41. Номинальные напряжения приемников электрической энергии, генераторов и трансформаторов. Взамен ОСТ 4760 и 5155.
- ГОСТ 2745-44. Радиопомехи источников питания специальных радиостанций и переговорных устройств. Нормы. Метод измерения.
- ГОСТ 2182-43. Шкалы номинальных напряжений накала и анодных напряжений электронных ламп и газоразрядных вентиляй с твердым накаливаемым катодом. Взамен ОСТ 40064 и 40067.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

- ГОСТ 183-41. Машины электрические (основной стандарт). Взамен ОСТ 20020 и ОСТ Эл20-40.
- ГОСТ 2108-43. Машины электрические. Номенклатура узлов и деталей.
- ГОСТ 2479-44. Машины электрические. Формы исполнения и их условные обозначения.
- ГОСТ 533-41. Генераторы паротурбинные двухполюсные с воздушным охлаждением. Взамен ОСТ/ВКС 7429.
- ГОСТ 609-41. Компенсаторы синхронные мощностью от 1 000 до 50 000 кВА. Взамен ОСТ/НКТП 2795.
- ГОСТ 186-41. Электродвигатели трехфазные асинхронные с короткозамкнутым ротором мощностью до 100 kW. Взамен ОСТ/НКТП 7341/443.
- ГОСТ В-1042-41. Электродвигатели трехфазные асинхронные с фазовым ротором мощностью до 1 500 kW. Взамен ОСТ/НКТП 2706 и 3092.
- ГОСТ 184-41. Электродвигатели крановые, подъемные и металлургические постоянного тока. Взамен ОСТ/НКТП 7306/363.
- ГОСТ 185-41. Электродвигатели крановые, подъемные и металлургические трехфазного тока. Взамен ОСТ/НКТП 7307/364.
- ГОСТ 2582-44. Электродвигатели тяговые постоянного тока. Взамен ОСТ/НКМ 4320.
- ГОСТ 2308-43. Турбогенераторы малой мощности, транспортные.

- ГОСТ В-1651-42. Генераторы низковольтные многоамперные постоянного тока коллекторные.
- ГОСТ 2167-43. Генераторы постоянного тока двухколлекторные для зарядки аккумуляторных батарей.
- ГОСТ 2535-44. Генераторы постоянного тока одноколлекторные зарядно-буферные.
- ГОСТ 304-41. Генераторы постоянного тока для дуговой сварки.
- ГОСТ 2402-44. Агрегаты для дуговой сварки с двигателями внутреннего сгорания. Взамен ОСТ Эл22-40.
- ГОСТ 297-41. Машины электросварочные контактные. Взамен ОСТ/НКТП 2839.
- ГОСТ 731-41. Генераторы постоянного тока для самолетов. Регуляторные и фильтровые коробки к ним (основные пиromетры).
- ГОСТ В-1818-42. Генераторы постоянного тока для самолетов. Регуляторные и фильтровые коробки к ним. Технические условия. Правила приемки.
- ГОСТ 2710-44. Электродвигатели постоянного тока для механизмов дистанционного управления самолетов.
- ГОСТ 2641-44. Синхронный двигатель номинальной мощности на выходной оси 12 mW.
- ГОСТ 2829-45. Магнето автотракторные. При соединительные и установочные размеры.
- ГОСТ 3048-45. Генераторы автомобильные и тракторные с креплением на лапах и на фланце. Присоединительные размеры.
- ГОСТ 2329-43. Выпрямители ртутные.
- ГОСТ 401-41. Трансформаторы силовые масляные. Взамен ОСТ/НКТП 2524.
- ГОСТ 1983-43. Трансформаторы напряжения. Взамен ОСТ/НКТП 2707 и ОСТ/НКМ 4330.
- ГОСТ 1495-45. Трансформаторы понижающие для питания ламп местного освещения. Взамен ГОСТ В-1495-42.
- ГОСТ 2181-43. Трансформаторы шахтные трехфазные. Взамен ОСТ/НКТП 8355/1118.
- ГОСТ 2759-44. Трансформаторы однофазные специальные к дуговым электропечам для плавки меди, ее сплавов и чугуна.
- ГОСТ 95-41. Трансформаторы однопостовые для дуговой сварки. Взамен ОСТ/НКТП 8855/2206.
- ГОСТ 687-41. Выключатели высоковольтные. Взамен ОСТ/НКТП 8556/1116.
- ГОСТ 688-41. Приводы к выключателям высоковольтным. Взамен ОСТ/НКТП 8557/1600.
- ГОСТ 689-41. Разъединители высоковольтные для внутренних и наружных установок. Взамен ОСТ/ВКС 5685.

¹ Утвержденные Всесоюзным комитетом стандартов (ВКС) с 1940 г. по 1945 г. и действующие в настоящее время.

² Цифры после тире указывают на год утверждения стандарта.

- ГОСТ 690-41. Приводы к разъединителям высоковольтным для внутренних и наружных установок. Взамен ОСТ/НКТП 8558/1598.
- ГОСТ 2213-43. Предохранители высоковольтные переменного тока. Взамен ОСТ ЭЛ17-40.
- ГОСТ 2774-44. Аппараты электрические низкого напряжения промышленного применения. Терминология.
- ГОСТ 2933-45. Аппараты электрические низкого напряжения. Методы основных испытаний.
- ГОСТ 403-41. Аппаратура низковольтная. Допустимые температуры контактов и медных шин.
- ГОСТ 2585-44. Выключатели автоматические быстродействующие постоянного тока.
- ГОСТ 711-41. Реле вторичные защитные (основной стандарт).
- ГОСТ 2221-43. Контакторы переменного тока силовые на номинальные токи от 40 до 600 А.
- ГОСТ 2758-44. Контакторы постоянного тока силовые на номинальные токи от 40 до 600 А.
- ГОСТ 3041-45. Предохранители с закрытыми разборными патронами без наполнителя на номинальные напряжения до 500 В.
- ГОСТ 2491-44. Пускатели магнитные для электродвигателей с короткозамкнутым ротором.
- ГОСТ 2492-44. Кнопки управления для электромагнитных аппаратов.
- ГОСТ 2327-43. Рубильники и переключатели открытого исполнения на номинальные токи до 1000 А при номинальном напряжении до 500 В.
- ГОСТ В-1282-41. Конденсаторы для повышения коэффициента мощности.
- ГОСТ 2519-44. Конденсаторы электрические. Нормальная шкала емкостей.
- ГОСТ 2825-45. Сопротивления электрические постоянные непроволочные. Шкала номинальных значений.
- ГОСТ 2332-43. Щетки для электрических машин.
- ГОСТ 1361-42. Щитки и маски для защиты электросварщика.
- ГОСТ В-1503-42. Свечи зажигательные искровые для авиационных двигателей, экранированные. Взамен ОСТ 5267.
- ГОСТ В-2043-43. Свечи зажигательные искровые для двигателей автотракторного типа. Взамен ОСТ 5257.

КАБЕЛИ И ПРОВОДА

- ГОСТ В-985-41. Кабели для сигнализации и блокировки. Взамен СТ/ГЦМО 25.2978.
- ГОСТ В-1176-41. Кабели телефонные двухпроводные с воздушнобумажной изоляцией.
- ГОСТ В-1508-42. Кабели электрические контрольные с резиновой изоляцией. Взамен ОСТ ЭЛ3-40.
- ГОСТ 340-41. Кабели электрические силовые с медными жилами, с изоляцией из пропитанной кабельной бумаги. Взамен ОСТ/ВКС 6260.
- ГОСТ 433-41. Кабели электрические силовые с резиновой изоляцией освинцованные. Взамен ОСТ/НКТП 3516.
- ГОСТ 2990-45. Кабели, провода и шнуры с резиновой изоляцией. Методы испытания напряжением.
- ГОСТ В-974-41. Провода автомобильные и тракторные низкого напряжения. Взамен СТ 25-1771, 25-1510, 25-25039, 25-25040.
- ГОСТ 839-41. Провода голье медные, алюминиевые и сталя алюминиевые. Взамен ОСТ/НКТП 7943/741; ОСТ/ВКС 5363.

- ГОСТ 1977-43. Провода и шнуры установочные с медными жилами с резиновой изоляцией. Взамен ОСТ/НКТП 3510.
- ГОСТ 434-41. Провода медные обмоточные, шины и ленты медные для электротехнических целей. Взамен ОСТ/НКТП 8616/1681.
- ГОСТ В-1843-42. Провода с медными жилами с резиновой изоляцией в металлических защитных оболочках. Взамен ОСТ/НКТП 3508.
- ГОСТ В-1920-42. Провода с резиновой изоляцией для военно-полевой связи.
- ГОСТ 2190-43. Провода саперные.
- ГОСТ 2262-43. Провода электрические лакированные для самолетов.
- ГОСТ 2584-44. Провод медный контактный (троллейный).
- ГОСТ 2773-44. Проволока медная эмалированная.
- ГОСТ 2650-44. Шнуры и кабели шланговые.
- ГОСТ 2932-45. Шнуры телефонные и коммутаторные с волокнистой изоляцией.
- ГОСТ В-1956-43. Жилы токопроводящие кабельных изделий с резиновой изоляцией.
- ГОСТ 1915-42. Наконечники кабельные трубчатые типа Т.
- ГОСТ В-2112-43. Проволока медная круглая для электрических кабелей, проводов и шнурков.
- ГОСТ 2068-43. Резина для электрических кабелей проводов и шнурков.

ИЗОЛЯТОРЫ, АРМАТУРА И УСТАНОВОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОИЗДЕЛИЯ

- ГОСТ 1232-41. Изоляторы фарфоровые линейные для высокого напряжения. Взамен ОСТ 3370.
- ГОСТ 2366-43. Изоляторы телеграфно-телефонные. Взамен ОСТ 80004.
- ГОСТ 2721-44 по 2744-44 вкл. Арматура для линий передач высокого напряжения.
- ГОСТ 864-41. Электроизделия установочные. Общая методика испытаний. Взамен ОСТ 4040, 4041, 4042.
- ГОСТ 2634-44. Фарфор для установочных электроизделий, работающих при напряжении до 500 В.
- ГОСТ 361-41. Патроны Свана без выключателей для ламп накаливания. Взамен ОСТ ЭЛ9-40.
- ГОСТ 2746-44. Патроны Эдисона для электрических ламп накаливания.
- ГОСТ 1138-41. Предохранители установочные однополюсные с резьбой Эдисона. Взамен ОСТ/НКТП 8853/2182.
- ГОСТ В-505-42. Электроизделия установочные низковольтные для самолетов, танков и автобронемашин.
- ГОСТ 2772-44. Электроизделия установочные защищенного и герметического исполнения для кораблей.
- ГОСТ 2709-44. Панели ламповые октальные.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

- ГОСТ 2214-43. Лакоткань электроизоляционная (хлопчатобумажная и шелковая).
- ГОСТ 2196-43. Микант коллекторный.
- ГОСТ 2666-44. Микант формовочный, прокладочный и гибкий.
- ГОСТ 2857-45. Микалента и микафолий.
- ГОСТ 2718-44. Гетинакс листовой электротехнический.
- ГОСТ 2910-45. Текстолит листовой электротехнический.
- ГОСТ 2748-44. Эбонит электротехнический.
- ГОСТ 2824-45. Картон электроизоляционный марки ЭВ (электропрессшпан ЭВ).
- ГОСТ 2256-43. Лаки электроизоляционные. Методы испытаний.
- ГОСТ 629-41. Доски электротехнические мраморные.

ГОСТ 3028-45. Слюда щипаная. Взамен ОСТ 4264.

ГОСТ 1201-41. Бумага для оклейки электротехнической стали. Взамен ОСТ 4876.

ГОСТ 1931-42. Бумага изоляционная намоточная. Взамен ОСТ Наркомлеса 8143/122.

ГОСТ 645-41. Бумага кабельная. Взамен ОСТ Наркомлеса 6321/31.

ГОСТ 1908-42 Бумага конденсаторная. Взамен ОСТ Наркомлеса 261.

ГОСТ 2162-43. Лента изоляционная прорезиненная. Взамен ОСТ 399 и 1443.

ГОСТ 982-43. Масло трансформаторное. Взамен ГОСТ 982-41.

ГОСТ 2845-45. Трубы угольные для электрических печей сопротивления.

ГОСТ 802-41. Сталь листовая электротехническая. Взамен ОСТ/ВКС 6391.

ГОСТ 2615-44. Лента высокого омического сопротивления из жаростойких сплавов.

ГОСТ 2238-43. Проволока высокого омического сопротивления из жаростойких сплавов.

ГОСТ 2419-44. Металлы. Метод ускоренного определения срока службы проволоки для электронагревательных элементов.

СВЕТО- И ВАКУУМТЕХНИКА

ГОСТ 1002-41. Городское электрическое освещение (нормальное и маскировочное). Нормы проектирования.

ГОСТ 2239-43. Лампы накаливания электрические нормальные осветительные. Взамен ОСТ 5154.

ГОСТ В-1182-41. Лампы накаливания электрические для местного освещения.

ГОСТ В-1319-41. Лампы накаливания электрические светомаскировочные.

ГОСТ В-1181-41. Лампы накаливания электрические железнодорожные.

ГОСТ В-2023-43. Лампы накаливания электрические для автомобилей, танков и тракторов. Взамен ОСТ/НКТП 7867/736.

ГОСТ В-1511-42. Лампы накаливания электрические для самолетов и танков. Взамен ОСТ 7214.

ГОСТ В-1608-42. Лампы накаливания электрические судовые. Взамен ОСТ/НКТП 7213/384.

ГОСТ 2204-43. Лампы накаливания низковольтные миниатюрные. Взамен ОСТ 40017.

ГОСТ В-1914-42. Лампы генераторные и усиительные мощные. Взамен ОСТ 40025, 40029, 40069.

ГОСТ 1880-44. Лампы электронные маломощные. Взамен ОСТ В-1880-42.

ГОСТ 1879-42. Лампы электронные маломощные. Методы электрических испытаний.

ГОСТ 866-41. Трубы рентгеновские электронные.

ГОСТ В-1149-41. Цоколи свана для электрических ламп накаливания.

ГОСТ 2520-44. Цоколи с резьбой Эдисона для электрических ламп накаливания.

ГОСТ В-1507-42. Светильник для маскировочного освещения улиц.

ГОСТ В-2010-43. Устройство для светомаскировки автомобилей.

АККУМУЛЯТОРЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

ГОСТ 825-41. Аккумуляторы электрические свинцовые для стационарных установок.

ГОСТ 795-41. Аккумуляторы электрические свинцовые телеграфно-телефонные.

ГОСТ 959-41. Батареи аккумуляторные свинцовые стартерные для колесных и гусеничных транспортных машин. Взамен ОСТ 5019 и 5020.

ГОСТ В-1882-42. Батареи аккумуляторные щелочные (кадмиево-никелевые) для переносных фонарей.

ГОСТ 1112-41. Элементы гальванические мокрые «Геркулес».

ГОСТ 296-41. Элементы гальванические сульфиды б с МВД. Взамен ОСТ 40040.

ГОСТ 2583-44. Батареи для карманных фонарей из сухих гальванических элементов.

ГОСТ 3004-45. Элементы и батареи гальванические. Методы испытаний.

ГОСТ 1226-41. Стеллажи для стационарных установок электрических свинцовых аккумуляторов.

СВЯЗЬ

ГОСТ 60-40. Телевидение. Основные параметры телевизионного вещания. Взамен ОСТ 40195.

ГОСТ 464-41. Заземления для установок проводной связи. Взамен ОСТ 2574.

ГОСТ 67-40. Пересечения проводов связи с проводами контактной сети электрических железных дорог, контактными трамвайными и троллейными проводами. Правила. Взамен ОСТ/НКСвязи 8534/1-122.

ГОСТ 109-41. Шкафы телефонные распределительные.

ГОСТ 104-41. Шкафы телефонные распределительные в нишах.

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

ГОСТ 1845-42. Приборы электроизмерительные. Общие технические условия. Взамен ОСТ 40008.

ГОСТ 3043-45. Приборы электроизмерительные. Пределы измерений. Взамен ОСТ 40189.

ГОСТ 2930-45. Приборы электроизмерительные и теплотехнического контроля. Шрифты и знаки для циферблатов. Взамен ОСТ 40093.

ГОСТ 3051-45. Стрелки щитовых приборов электроизмерительных и теплотехнического контроля. Формы и размеры указывающей части.

ГОСТ 1504-42. Приборы измерительные электрические. Отбор проб и приемка. Взамен ОСТ 40100.

ГОСТ В-1700-42. Амперметры автомобильные.

ГОСТ 1852-42. Милиамперметры дифференциальные для телеграфных аппаратов. Взамен ОСТ 40140.

ГОСТ 991-41. Потенциометры с линейным реохордом. Общие технические условия. Взамен ОСТ 40139.

ГОСТ 990-41. Омметры типа ЛМВ (мост Уитстона линейный). Общие технические условия. Взамен ОСТ/НКТП 3009.

ГОСТ 954-41. Омметры карманные. Общие технические условия. Взамен ОСТ/НКТП 3008.

ГОСТ В-1609-42. Провода калиброванные для электроизмерительных приборов.

ГОСТ 1827-42. Сопротивления добавочные. отдельные для вольтметров. Взамен ОСТ 40103.

ГОСТ 1954-42. Элементы Вестона нормальные. Общие технические условия. Взамен ОСТ-ВКС 7457.

ГОСТ 3044-45. Термопары. Градуировочные таблицы термопар при температуре свободного конца 0° С. Взамен ОСТ 40114.

ГОСТ В-1790-42. Проволока для термоэлектродов термопар из сплавов хромель, алюминий и копель.

ГОСТ В-1791-42. Проволока из никелевых и медно-никелевых сплавов для компенсационных проводов к термопарам.

ЭЛЕКТРОБЫТОВЫЕ ПРИБОРЫ

- ГОСТ 303-41.** Приборы электронагревательные бытовые переносные (основной стандарт). Взамен ОСТ 4323 и 4324.
- ГОСТ 306-41.** Плитки электрические нагревательные бытовые.
- ГОСТ 307-41.** Утюги электрические бытовые.
- ГОСТ 308-41.** Печи электрические отражательные бытовые.

СПИСОК

номеров журнала «Электричество», в которых были опубликованы сообщения о стандартах

1. Н. П. Галочкин. Новый ГОСТ на электрические машины. № 4, 1941.

2. Буквенные обозначения общетехнических и основных электротехнических величин. № 1—2, 1945.

3. Г. С. Плис. Новые стандарты на электрические машины. № 5—6, 1944.

4. У. М. Литваков. Новые стандарты на электрические аппараты низкого напряжения. № 12, 1945.

5. У. М. Литваков. Новые стандарты на электризационные материалы. № 1, 1946.

6. У. М. Литваков. Новый стандарт на тяговые электродвигатели. № 2, 1946.

7. У. М. Литваков. Новые стандарты на установочные электроизделия. № 4, 1946.

8. У. М. Литваков. Новый стандарт на ртутные выпрямители. № 4, 1946.

Новые стандарты на установочные электроизделия

За последние годы Всесоюзным комитетом стандартов (ВКС) утверждены 6 стандартов на установочные электроизделия общего применения.

ГОСТ 2634-44. Фарфор для установочных электроизделий, работающих при напряжении до 500 В. Утвержден 31 августа 1944 г. со сроком введения с 1 января 1945 г.

Стандарт распространяется на фарфор, который самостоятельно или после сборки с металлическими частями является законченным электротехническим изделием, применяемым для работы на открытом воздухе и в закрытых как сухих, так и сырых помещениях.

Стандартом предусмотрен фарфор, изготавляемый следующими способами: методом прессовки из порошкообразной массы в металлических прессформах, методом лепки, формовки, литья и вытяжки через мундштук. Фарфор каждого способа изготовления подразделяется на 1-й и 2-й сорт в отношении допустимой непараллельности торцевых поверхностей, искривления опорной и боковой поверхности и внешнего вида.

В стандарте приведены предельные размеры изделий фарфора, допускаемые отклонения от номинальных размеров в зависимости от способа изготовления фарфора и допустимые дефекты внешнего вида.

Фарфор согласно стандарту должен выдерживать в течение 1 ч при относительной влажности $95 \pm 3\%$ и температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ напряжение в 2 000 В переменного тока частотой 50 Hz без пробоя или явлений разрядного характера. Сопротивление изоляции фарфора должно быть в этих условиях не менее $20 \text{ M}\Omega$. Водопоглощаемость фарфора не должна превышать 0,5%. Изделия из фарфора должны выдерживать без повреждений двухкратный цикл резких изменений температуры, следующих друг за другом. Величина температурного перепада при этом испытании установлена в 70°C .

ГОСТ 361-41. Патроны Свана без выключателей для ламп накаливания (взамен ОСТ Эл-9-40). Утвержден 19 марта 1941 г. со сроком введения с 1 мая 1941 г.

Стандарт распространяется на установочные одноконтактные (типы 1С-15¹) и двухконтактные (типы 2С-15 и 2С-22) патроны Свана с оболочками из металла или пластмассы, предназначенные для включения ламп накаливания мощностью до 50 W при напряжении до 36 V и мощностью до 100 W при напряжении до 250 V.

Стандартом установлены: сопрягаемые размеры (по отношению к цоколям ламп накаливания), допустимое превышение температуры контактных частей патрона, электрическая прочность и сопротивление изоляции, требования, которым должен удовлетворять патрон в отношении вибрации и тряски, а также ряд других требований, обеспечивающих надлежащее качество патронов Свана.

ГОСТ 2746-44. Патроны Эдисона для электрических ламп накаливания. Утвержден 25 декабря 1944 г. со сроком введения с 1 октября 1945 г.

Стандарт распространяется на установочные патроны без выключателя с оболочкой из металла, фарфора или пластмассы с цельной металлической гильзой или с отдельными металлическими пластинками вместо нее.

Стандартом предусмотрены патроны типов Е-10, Е-14, Е-27 и Е-40, предназначенные соответственно для включения ламп накаливания мощностью до: 50 W, 100 W, 300 W и 2 000 W. Патроны типа Е-10 предназначены только для напряжения 36 V, патроны типа Е-14 — для 127 V и 220 V, патроны типов Е-27 и Е-40 — для 220 V и 500 V, причем при применении патрона типа Е-40 при напряжении 500 V мощность лампы не должна превышать 1 000 W.

В стандарте приведены: рабочая глубина патрона (расстояние от края контактной гильзы до центрального контакта), допустимое превышение температуры контактных частей, электрическая прочность и сопротивление изоляции, теплостойкость, механическая прочность и ряд других требований.

ГОСТ 1138-41. Предохранители установочные однополюсные с резьбой Эдисона (взамен ОСТ/НКТП 8853/2182). Утвержден 25 августа 1941 г. со сроком введения с 1 января 1942 г.

Стандарт охватывает предохранители с прямоугольным основанием (подвод тока спереди или через токоведущие проходные болты сзади) и с квадратным основанием (подвод тока только сзади через токоведущие проходные болты) типов: Е-14 (250 V, 10 A), Е-27 (500 V, 20 A) и Е-33 (500 V, 60 A).

В стандарте приведены: номинальные токи оснований плавких вставок и контактных винтов предохранителей, стандартизованные размеры предохранителей, допустимое превышение температуры контактных частей, электрическая прочность и сопротивление изоляции, теплостойкость и ряд других требований.

Плавкие вставки в соответствии со стандартом должны выдерживать без расплавления мостика наименьший испытательный ток (1,5—1,3 номинального тока плавкой вставки) в течение времени не менее 1 h, а при нагрузке небольшим испытательным током (2,1—1,6 номинального тока плавкой вставки) мостик должен расплавляться не позднее чем через час без взрывов, разрушения тела вставки, выбрасывания пламени и раскаленных частичек.

ГОСТ 1171-41. Ролики фарфоровые. Утвержден 19 сентября 1941 г. со сроком введения с 1 января 1942 г.

Стандарт распространяется на фарфоровые ролики, применяемые для крепления изолированных проводов в сухих и сырых помещениях при напряжении до 500 V.

¹ Последние две цифры в обозначении типа характеризуют внутренний диаметр оболочки патрона.

Стандартом предусмотрено 7 типов роликов для сухих помещений (РШ-4; РП-2,5; РП-6; РП-16; РП-35; РП-70 и РП-20) и 8 типов роликов для сырых помещений (РСШ-4; РСШ-10; РСШ-25; РСШ-70; РСВ-4; РСВ-10; РСВ-25 и РСВ-70).

Ролики для сухих помещений типа РШ применяются для крепления шнура, а типа РП — для крепления провода. Ролики для сырых помещений типа РСШ крепятся на штыре, а типа РСВ — на винте. Цифры в обозначении типа роликов указывают максимальное сечение проводов в миллиметрах, для крепления которых может быть применен ролик данного типа.

В части технических требований в стандарте приведены лишь механическая прочность роликов на скалывание их головки, так как в остальном ролики должны отвечать требованиям ГОСТ 2634-44 на фарфор для установочных электроизделий.

Все перечисленные стандарты содержат также разделы: «Правила приемки», «Методы испытаний», «Маркировка и упаковка».

ГОСТ 864-41. Электроизделия установочные. Общая методика испытаний (взамен ОСТ 4040 по 4012). Утвержден 16 июня 1941 г. со сроком введения с 1 января 1942 г.

Стандарт устанавливает методы испытаний на теплостойкость, механическую прочность, электрическую прочность и сопротивление изоляции установочных электроизделий бытового и промышленного назначения на номинальные напряжения до 500 В.

При испытании на теплостойкость установочные электроизделия должны выдержать в течение 2 ч пребывание в термостате. Испытательная температура в термостате устанавливается в зависимости от рабочей температуры, до которой в условиях эксплоатации при номинальной нагрузке может нагреться изделие в месте наивысшего

нагрева. Стандарт делит установочные электроизделия в зависимости от их рабочей температуры на 6 групп и для каждой из групп устанавливает испытательную температуру.

Испытания установочных электроизделий на механическую прочность производятся ударом свободно падающего груза (стальной боец) на специальном станке, устройство которого в схематическом виде приводится в стандарте.

Установочные электроизделия в зависимости от условий их работы подразделяются стандартом в отношении механической прочности на три группы.

Установочные электроизделия, предназначенные для работы в условиях тряски и вибрации, кроме испытания ударом должны при испытании на механическую прочность подвергаться испытаниям на тряску и вибрацию. Испытание на тряску согласно стандарту должно продолжаться в течение от 5 мин до 3 ч при ускорении от 70 до 100 м/sec² и числе ударов от 80 до 100 в мин, а испытание на вибрацию в течение от 2 до 10 ч при амплитуде колебаний от 0,5 до 2 мм и числе колебаний от 600 до 3 000 в мин. Испытания на вибрацию производятся под током. В стандарте приведены примерные схемы приспособлений для испытаний на тряску и вибрацию.

Испытание на электрическую прочность и сопротивление изоляции производится в гигростате при относительной влажности не менее 96% и температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

В стандарте приведены основные параметры гигростата и указано его примерное исполнение.

Измерение сопротивления изоляции производится постоянным током напряжения 500 В. Сопротивление изоляции установочных электроизделий в вышеуказанных условиях должно быть не менее 2 М Ω .

Значения испытательных напряжений, которые изделия должны выдержать без пробоя или перекрытия, в зависимости от номинальных напряжений изделий, колеблются от 500 до 2 000 В.

Новый стандарт на ртутные выпрямители

В конце 1943 г. после рассмотрения Техническим советом Наркомата электропромышленности вопроса о выпрямительстве был разработан проект стандарта на ртутные выпрямители, утвержденный 25 декабря 1943 г. Всесоюзным комитетом стандартов (ВКС) как ГОСТ 2329-43 со сроком введения с 1 июля 1944 г. При утверждении нового стандарта постановлением ВКС были отменены ОСТ/ВКС 6392 «Выпрямители ртутные металлической конструкции» и ОСТ/ВКС 6393 «Трансформаторы для питания выпрямителей ртутных металлической конструкции».

Ниже приводится краткая аннотация нового стандарта.

Стандарт распространяется на ртутные выпрямители, рассчитанные на номинальные выпрямленные токи от 6 до 6 000 А при номинальном выпрямленном напряжении до 3 300 В. В стандарте кроме требований к самим выпрямителям помещены также требования к главным (анодным) трансформаторам.

В разделе «Определения» даны основные термины, относящиеся к ртутным выпрямителям («Ртутный вентиль», «Ртутный выпрямитель», «Выпрямительный агрегат» и др. Всего даны определения 12 терминов).

В разделе «Классификация» стандарта приведено подразделение ртутных выпрямителей в зависимости от конструкции вентиля на 6 групп и установлены новые обозначения каждого из разновидностей выпрямителей, а именно: стеклянные (РС), стеклянно-металлические с водяным охлаждением катода (РСВ), металлические запаянные с воздушным охлаждением (РМ) и с водяным охлаждением (РМВ), металлические с вакуумными насосами (разборные) с воздушным охлаждением (РМН) и с водяным охлаждением (РМНВ).

Полное обозначение типа выпрямителя получается путем прибавления к вышеприведенным буквенным обозначениям через тире номинального выпрямленного тока выпрямителя, причем для выпрямителя, скомплектованного из одноанодных вентиляй, указывается постоянная составляющая выпрямленного тока в вентиле, умноженная на число вентиляй.

Таким образом, в соответствии со вновь утвержденным стандартом многоанодные выпрямители, обозначаемые ранее, в соответствии с каталогом завода «Электросила»: РВ-5, РВ-10, РВ-20 и т. д., должны теперь обозначаться РМНВ-500, РМНВ-1000, РМНВ-2000 и т. д.

В разделе «Технические условия» приведена следующая шкала номинальных выпрямленных напряжений, на которые должны изготавливаться выпрямительные агрегаты: 115, 230, 245, 275, 460, 600, 825, 1 650 и 3 300 В, причем эта шкала не распространяется на выпрямительные агрегаты, предназначенные для электролиза и для зарядных устройств. Приведенные в шкале напряжения 245 и 275 В применять не рекомендуется.

Стандартом установлены в зависимости от области применения выпрямительных агрегатов шкала выпрямленных токов и допустимые перегрузки.

Падение напряжения в дуге ртутного выпрямителя при номинальном токе, определяемое как среднее за проводящую часть периода, не должно быть выше согласно стандарту 20 В для выпрямителей на токи до 1 000 А включительно и 25 В для выпрямителей на токи свыше 1 000 А. В стандарте приведены номинальные первичные напряжения главных трансформаторов в зависимости от мощности выпрямителя, схемы соединений главных трансформаторов и условия параллельной работы выпрямительных агрегатов. Уделено большое внимание вопросам регулирования напряжения и защите.

В соответствии со стандартом выпрямители на nominalnyy vyprymlennyi tок 1 000 A и более, а также выпрямители на 1 650 и 3 300 V при наличии требованиян заказчика должны изготавляться с управляющими сетками или с регулируемым моментом зажигания (в игнитронах). Выпрямители на токи 300 и 500 A также могут изготавляться с регулируемым моментом зажигания. Регулирование выпрямленного напряжения у выпрямителей на 200 A и менее, выполняемых неуправляемыми, осуществляется в случае необходимости при помощи главного трансформатора с регулировочными ответвлениями в обмотке и с коммутатором.

Выпрямительные агрегаты мощностью 100 kW и выше в соответствии со стандартом должны быть защищены со стороны питающей сети высоковольтным выключателем с продолжительностью отключения токов короткого замыкания не более 0,15 или 0,25 sec. (в зависимости от мощности агрегата). Выпрямительные агрегаты мощностью более 100 kW, работающие параллельно на общие шины выпрямленного тока, должны быть защищены со стороны шин постоянного тока быстродействующими выключателями обратного тока с продолжительностью отключения не более 0,03 sec.

Если выпрямительный агрегат защищен быстродействующими выключателями обратного тока с продолжительностью отключения не более 0,03 sec., установленными в цепи каждого анода, то в соответствии со стандартом защита со стороны питающей сети и со стороны шин постоянного тока, как указано выше, не обязательна.

Выпрямители, защита которых отвечает вышеуказанным требованиям, должны в соответствии со стандартом выдерживать три глухих коротких замыкания на шинах подстанции, следующие: второе через 1 мин. после первого, а третье через 2 min. после второго. Трансформаторы же должны выдерживать без повреждений обратные зажигания в выпрямителе при короткие замыкания в сети постоянного тока.

Кроме перечисленных требований в разделе «Технические условия» стандарта приведены величины испытательных напряжений для отдельных частей выпрямительного агрегата, требования к охлаждающей выпрямитель воде и ряд других.

В разделе «Правила приемки» стандарта приведены программы контрольных и типовых испытаний запаянных и разборных металлических выпрямителей, комплектного устройства стеклянных ртутных выпрямителей, шкафов с аппаратурой управления и главных трансформаторов.

Стандарт устанавливает, что при наличии требованиян заказчика завод-изготовитель обязан сдать разборный выпрямитель на месте установки, приняв на себя шефмонтаж по формовке, наладке и включению выпрямителей в эксплуатацию. Выпрямитель в этом случае считается сданным, если он проработал бесперебойно на реальную нагрузку или на реостат в течение 24 h.

*Материалы по стандартам составил
Инж. У. М. ЛИТВАКОВ*



Библиография

Учебник по электрическим машинам для энергетических институтов

Проф. М. П. Костенко. Электрические машины. Допущено в качестве учебника для энергетических институтов. Госэнергоиздат, 1944, 815 стр., 666 рис., ц. 38 руб.

Автор книги является широко известным специалистом по электрическим машинам. Будучи долгое время непосредственно связанным с практикой крупнейших предприятий электромашиностроения, член-корр. АН СССР М. П. Костенко имеет также многолетний опыт научно-педагогической работы в области электрических машин в качестве профессора Ленинградского политехнического института им. Калинина. Раздел трансформаторов в книге написан доктором технических наук А. В. Трамбицким, безвременно скончавшимся в Ленинграде в 1942 г.; вводный раздел написан главным инженером завода «Электросила» им. Кирова Д. В. Ефремовым. Естественно, что книга таких авторов представляет большой интерес.

Как сообщает в предисловии автор, книга содержит общий курс электрических машин, составленный на основе лекций, которые читались автором на электромеханическом факультете Ленинградского политехнического института. Созданный таким образом учебник является первым концентром курса электрических машин и предназначен для использования на всех специальностях электромеханических и энергетических факультетов вузов.

Книга состоит из восьми разделов: А. Общие сведения; этот вводный раздел включает изложение краткой истории развития электрических машин (гл. I), сведения о материалах, применяемых в электромашиностроении (гл. II), и об основных законах в применении к электрическим машинам (гл. III); Б. Машины постоянного тока. В. Трансформаторы. Г. Общие вопросы теории машин переменного тока. Д. Синхронные машины. Е. Асинхронные машины. Ж. Коллекторные машины переменного тока. З. Пускорегулирующая аппаратура.

Перечисленные разделы книги связаны с основными вопросами теории электрических машин и включают: сведения о конструктивных элементах основных типов электрических машин, об основных типах обмоток, об э. д. с., м. д. с. и реакции якоря, о диаграммах напряжений при симметричных нагрузках, о совместной работе электрических машин, характеристики, физическую трактовку и основные положения теории переходных процессов при включении, коротком замыкании и колебаниях и т. п.

В отношении общего содержания книги следует признать целесообразным то, что авторы в одном томе изложили сведения о всех основных типах электрических машин. Учебник, состоящий из нескольких томов, обычно бывает менее удобным для пользования.

Изложению собственно общего курса в рассматриваемой книге предшествует хорошо написанный раздел общих сведений, который, как нам кажется, только выиграл бы еще, если бы содержание гл. II было расширено и изложено в историческом разрезе, а также включало бы характеристики новейших материалов, применяемых в электромашиностроении. Далее следует изложение основного курса, начинаящего с машин постоянного тока.

Автор объясняет в предисловии, что порядок изложения принят им, исходя из удобства построения учеб-

ных планов различных специальностей и возможности своеевременной организации лабораторных занятий. Однако, как известно, существует и такое достаточно обоснованное мнение, что, начиная изложение курса с машин постоянного тока, можно нарушить представление об общности электромагнитных процессов в электрических машинах. Во всяком случае методическое построение курса, принятное проф. М. П. Костенко в этой части, представляется спорным.

В предисловии автор указывает, что более специальные и сложные вопросы теории электрических машин отнесены им к специальному курсу (второму концентру, который уже подготовлен к печати). Несколько условное разделение курса на общий и специальный может быть объяснено, повидимому, больше техническими, чем методическими соображениями — стремлением не увеличивать объем данного учебника. Но все же, по нашему мнению, в общий курс вне зависимости от сложности должны войти все те вопросы теории электрических машин, с которыми встречается в настоящее время инженерно-технический персонал, работающий по эксплуатации электрических машин. А в таком случае никак нельзя исключить из общего курса такие практически важные вопросы, как несимметричные режимы трансформаторов и синхронных генераторов, работы асинхронного двигателя при несимметричных условиях.

Хотя бы кратко, но следовало рассмотреть вопросы динамической устойчивости и влияние демпферной обмотки при качаниях синхронных машин, электродинамические усилия, возникающие при коротком замыкании и перенапряжении в трансформаторе. Цельность общего курса нарушается из-за отсутствия в нем хотя бы общей теории достаточно распространенных трехобмоточных трансформаторов, индукционных регуляторов и дробных обмоток в машинах переменного тока. Скупо изложены вопросы о двигателях с вытеснением тока в роторной обмотке, об однофазных асинхронных двигателях и особенно о работе асинхронной машины в режимах генератора и тормоза. В конечном итоге это привело к тому, что отдельные разделы книги заметно отличаются друг от друга по объему охватываемого ими материала. Наиболее ущемленными в этом смысле оказались разделы трансформаторов и асинхронных машин. К сожалению, в книге отсутствует очерк (хотя бы напечатанный петитом) о развитии серий машин постоянного тока и асинхронных двигателей, выпускаемых советскими электромашиностроительными заводами. Введение в учебник по электрическим машинам главы о пускорегулирующей аппаратуре следует признать удачным.

Общий курс электрических машин является уже достаточно определившимся с точки зрения положений, обычно в нем разбираемых. Поэтому надо признать весьма ценным введение проф. М. П. Костенко в свою книгу некоторых положений, до сих пор в учебниках не отмеченных. Таковыми следует признать: а) указание на важность построения многоугольников напряжений обмоток

машин постоянного тока, что помогает вскрыть те свойства обмоток, которые не оказываются еще очевидными после построения схемы обмоток (стр. 101—102); б) введение автором (заслед за Рихтером) понятия о коэффициенте Картера для расчетной длины якоря; в) мысли о качении магнитного поля машины из-за зубчатости активного слоя.

Характеризуя книгу в целом, можно сказать, что книга содержит глубокий, ценный и поучительный материал, в большинстве случаев с достаточной полнотой знакомящий читателя с предметом электрических машин. Это является основным достоинством рецензируемого учебника, тем более что в целом ряде мест теоретический материал дополнен весьма полезными практическими указаниями, причем некоторые из них обычно в учебниках не встречаются, как, например: указание на возможное при различных сортах щеток неодинаковое переходное сопротивление, что при отрицательном температурном коэффициенте материала щеток приводит к еще большей нагрузке током нагретых щеток (стр. 181, 182); указание, что потери на токи Фуко в обмотке машин постоянного тока должны получаться даже выше, чем в машинах переменного тока (стр. 245), и ряд других. Главы, описывающие элементы конструкции электрических машин (гл. I, гл. XXIII § 98, гл. XXV), иллюстрированы хорошо подобранными рисунками, что делает чтение их еще более интересным.

Однако некоторые замечания, относящиеся по преимуществу к методике изложения, при чтении книги все же возникают.

Методика изложения материала является для учебника особенно важной. И нам кажется, что именно в этой части к рецензируемой книге можно предъявить некоторые претензии. Основным методическим недостатком следует считать то, что автор далеко не всегда выделяет основные положения текста: ни в одной главе нет подчеркнутых (не в буквальном смысле) формулировок, которые иллюстрировали бы эти положения. Не делается этого даже и в тех главах, в которых читатель знакомится с рядом таких принципиальных вопросов, как реакция якоря, коммутация, параллельная работа, пульсирующие и бегущие волны, э. д. с. и м. д. с. якорной обмотки машины переменного тока и т. д.

Часто сложные явления бывает полезно излагать в нескольких приближениях, что облегчает также и необходимый анализ. Так, например, в синхронных машинах хорошо бывает пользоваться понятием о ведомом и ведущем магнитном поле статора или ротора при истолковании перехода от генераторного режима к двигательному. Отдельные темы изложены излишне подробно, причем подробность изложения не всегда определяется значимостью темы. Это относится в первую очередь к гл. VI (обмотки машин постоянного тока), VII (магнитная цепь электрической машины переменного тока). Можно было бы и не возражать против более подробного изложения отдельных вопросов, но необходимо в таком случае выделить в учебнике главное от второстепенного, давая последнее «питетом», чего ни в одном месте книги не сделано.

Черезур подробное, а в отдельных случаях чрезмерно лаконичное, а тем более нечеткое изложение отдельных частных вопросов должно быть также отнесено к дефектам методического характера. К сожалению, книга не вполне свободна от этих недостатков. Для иллюстрации сказанного приведем несколько примеров. Доказательство того, что в простой волновой обмотке число параллельных ветвей равно двум, сделано излишне лаконично, а потому неубедительно (стр. 88, строка 19 сверху). Основная фраза «...э. д. с. продолжает возрастать до тех пор, пока секции не начнут попадать под полюсы противоположной полярности» неточна и формально не является правильной. Не подчеркнуто, к чему относится среднее значение индукции на стр. 62, 113 — к полюсному делению или зубцовому. На той же стр. 113 не оговорено, что определение коэффициента Картера пригодно при условии одного и того же магнитного потока. Не вполне четко дана интерпретация того интересного обстоятельства, что в формуле $F_d = F_d K_e$ на стр. 113 коэффициент Картера может быть отнесен и к B_d и к δ при одном и том же конечном результате.

Далее, в гл. X, рассматривающей коммутацию в машинах постоянного тока, автор, объясняя причины искре-

ния, упоминает лишь об изменении плотности тока при коммутации, отличной от прямолинейной. Несомненно, основной причиной, вызывающей искрение, является чрезмерная плотность тока (теория Reid'a), но нельзя не указать, что для искрения нужна еще определенная разность потенциалов между краем щетки и коллекторной пластиной. Наконец, автор не приводит весьма интересного описания картины возникновения кругового огня, установленной проф. Броном (ХЭМЗ), с которой, по нашему мнению, было бы полезно ознакомить читателя.

Несмотря на большое внимание, уделяемое обмоткам машин постоянного тока, автор полностью обходит имеющий практическое значение вопрос так называемой избирательности тока, возможной в волновой обмотке при установке полного комплекта щеток.

В разделе машин постоянного тока не разобрано и не дано перечисление условий самовозбуждения. Также обойден вопрос о необходимости включения пускового реостата в цепь якоря двигателя постоянного тока, что необходимо было осветить в связи с разбором явлений при пуске двигателя. Можно высказать сожаление, что, хотя на протяжении всего курса автор несколько раз обращается к рассмотрению вопроса о нагреве электрических машин, он ни разу не приводит уравнения нагрева однородного тела, хотя это безусловно способствовало бы усвоению данного вопроса. Повидимому, этот вопрос отнесен к специальному курсу.

Изложив в § 86 векторные диаграммы трансформатора, автор в § 87 говорит, что на базе диаграмм работы трансформатора можно подойти к аналитическому выражению тех же зависимостей, после чего и выводит новые уравнения трансформатора. Представляется, что методически удобнее было бы поступить наоборот, а именно, физическое описание процесса непосредственно сопроводить соответствующими аналитическими выражениями. Объяснять отношение потерь холостого хода к потерям короткого замыкания при анализе условия максимума к. п. д. трансформатора только тем, что «обычные трансформаторы часто работают при неполной нагрузке» (стр. 350), не является достаточным. Для правильного уяснения читателем этого практического существенного вопроса нельзя не коснуться соображений о расходе и стоимости активных материалов.

Четкое определение понятий и внимательное отношение к принятым обозначениям является обязательным для учебника. Между тем можно привести ряд примеров, показывающих дефекты книги и в этом отношении.

В небольшом количестве, но все же встречаются дефекты стилистического характера, которых в данной книге можно было бы, вообще говоря, избежать. На стр. 579 выражение «Внезапное периодическое короткое замыкание» имеет в виду периодический ток внезапного короткого замыкания; там же написано «коэффициент взаимоиндукции статорной обмотки», а имеется в виду «с роторной обмоткой». Сюда же можно отнести «вталкивание потока» (стр. 581), «маловольтный вольтметр» (стр. 173) и др.

Большое количество замеченных опечаток (около 70) и почти такое же количество незамеченных значительно затрудняют чтение учебника. Известно, что книга заканчивалась автором и печаталась в трудных условиях военного времени и что по техническим причинам автору не была представлена возможность правки корректур. Поэтому автор не мог устранить целый ряд недочетов.

Резюмируя все сказанное, можно сделать вывод, что рецензируемая книга, хотя и имеет некоторые недочеты, насыщена весьма содержательным материалом, изложенным на высоком научном уровне, и соответствует основным требованиям, которые предъявляются к учебнику по электрическим машинам для энергетических институтов.

Остается высказать пожелание, чтобы во втором издании автору и издательству удалось устранить отмеченные недочеты, что сделает книгу еще более ценным пособием при изучении курса электрических машин.

Кроме того, следует пожелать скорейшего выпуска обещанного автором специального курса.

Доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов
Кандидат техн. наук, доц. В. Н. Андрианов

Однофазные распределительные электрические сети в США

(Обзор)

Распределительным электрическим сетям в США уделяется очень большое внимание. Капиталовложения в них часто превосходят по своим размерам расходы на сооружение электростанций и линий электропередачи (рис. 1). Для электроснабжения крупных городов в США

вание электрических сетей в целях изыскания еще более рациональных схем. Наметилась тенденция к применению для городских распределительных сетей однофазного тока и воздушных линий для передающей и распределительной сетей.

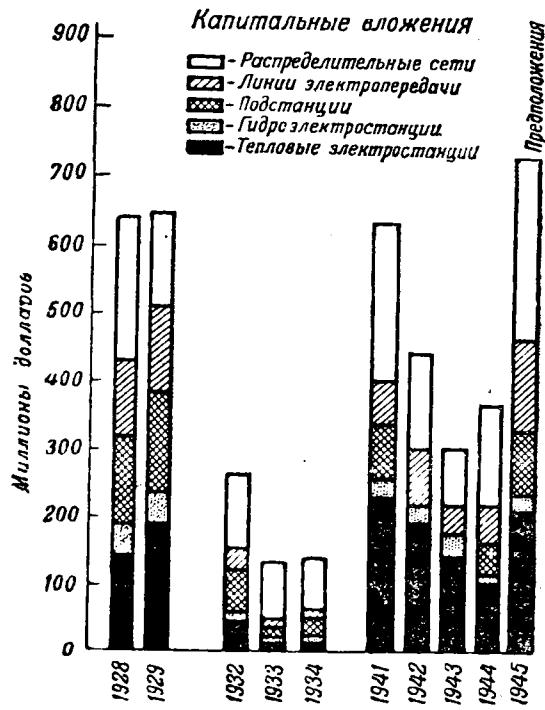


Рис. 1. Годовые капиталовложения на электростанции и линии электропередачи США.

разработаны и нашли широкое применение так называемые «замкнутые сетки». Схема замкнутой сетки низкого напряжения изображена на рис. 2 с, а схема сетки высокого напряжения—на рис. 3.

Широкое распространение получило также применение в распределительной сети двух напряжений. Первое напряжение (от 11 до 33 кВ) служит для передачи энергии в пределах города (Subtransmission), второе (2,2—4,2 кВ)—для распределения. Схема обеспечивает снижение затрат на основные фидеры путем повышения их напряжения, при одновременном удешевлении распределительных трансформаторов из-за применения напряжения 2—4 кВ. За последние 20 лет схема с двумя напряжениями и с сеткой 2 кВ или 4 кВ получили преимущественное распространение, и ряд городов реконструировал сети по этому принципу [Л. 1]. Схема отличается очень высокой надежностью, экономичностью, небольшими потерями энергии и малыми колебаниями напряжения.

Однако незадолго до начала второй мировой войны в США начались исследования и частичное переоборудование

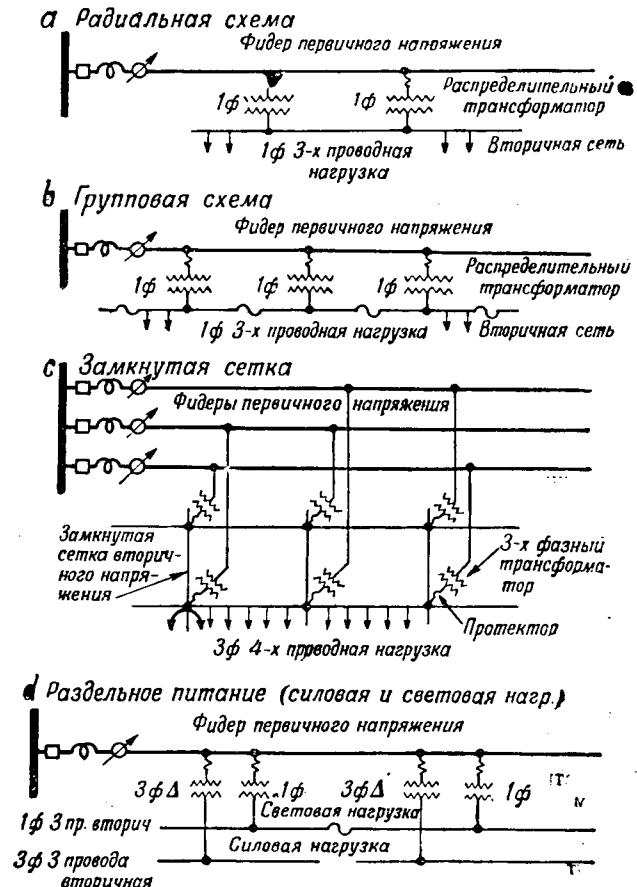


Рис. 2. Типы распределительных сетей.

Экономический анализ, основанный на опыте применения однофазного тока, приводит к заключению, что сети однофазного тока могут рассматриваться, как один из основных методов реконструкции городских сетей при росте коммунальных, осветительных и бытовых нагрузок [Л. 2].

Возможные варианты однофазных сетей представлены на рис. 2а, б и д. Питание однофазной сети производится от подстанций трехфазного тока, но магистральные линии выполняются однофазными с нейтральным заземленным проводом; присоединенные к ним трансформаторы также однофазные. В схемах 2а и 2б сеть низкого напряжения—однофазная трехпроводная обычно 120/240 В, с заземленным проводом; в схеме 2б (групповой) участки

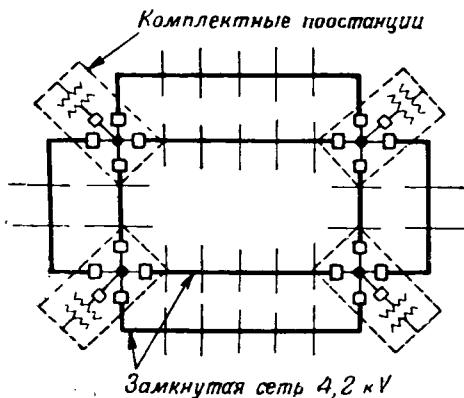


Рис. 3. Принципиальная схема замкнутой сети высокого напряжения 4,2 кВ.

вторичной сети, питающиеся от соседних трансформаторов, соединены через пластины предохранители. Схема рис. 2 *d* представляет смешанную сеть, трехфазную для силовой нагрузки и однофазную (групповую) для освещения и бытовой нагрузки.

Результаты экономического сравнения приведены на рис. 4. На диаграмме этого рисунка, а также на диаграмме рис. 5, приведены данные расчетов схем, изображенных на рис. 2. Кривые помечены теми же буквами, что и соответствующие им схемы рис. 2.

Сравнивались не только указанные выше варианты схем, но и различные варианты их выполнения,—с промежуточным напряжением 4 кВ (рис. 4A) и без него, с распределительной сетью 13,2 кВ (рис. 4B). Первичная сеть рассматривалась в трех вариантах: в виде воздушной линии, кабельной подземной прокладки и в виде кабеля, подвешенного на воздухе, при помощи троса. Сеть низкого напряжения во всех вариантах принималась воздушной.

При расчетах принималось падение напряжения (разница напряжений между первым и последним трансформатором высоковольтного фидера) в 3% на первичной стороне. Падение напряжения от пускового тока однофаз-

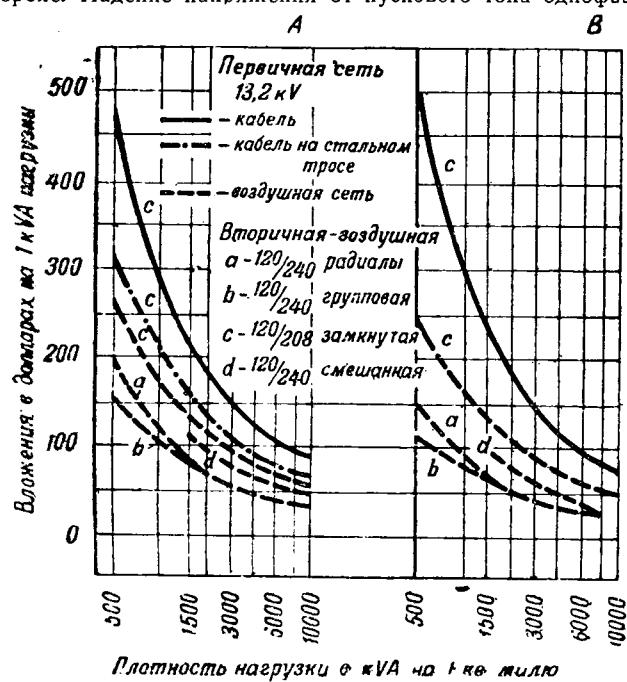


Рис. 4. Общие капиталовложения на 1 кВА нагрузки. В общие вложения на 1 кВА нагрузки включены: вторичная сеть (рис. 1), первичная сеть, в том числе столбы, первичные фидеры, подстанции, линии передачи. *A* — первичные сети 13,2 и 4,2 кВ; *B* — первичная сеть 13,2 кВ.

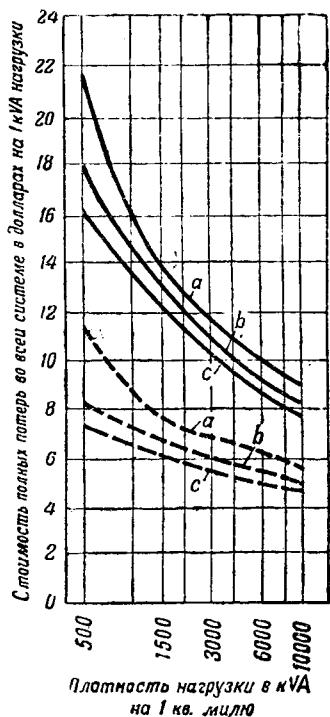


Рис. 5. Стоимость потерь (доллар на 1 кВА), включая потери в линиях передачи 13,2 кВ, первичной сети, распределительных трансформаторах и во вторичной сети.

транспортным центром, расположенным в районе с широко развитым сельским хозяйством (хлопок) и нефтепромышленностью. Переоборудование городской электрической сети началось в 1936 г. в связи с необходимостью ее расширения. Питание сети осуществлялось фидерами 13,2 кВ, имелась распределительная сеть 2 и 4 кВ и замкнутая сеть низкого напряжения (в центре города). Было решено отказаться от сетей 2 и 4 кВ и перейти на распределение однофазным током. После успешного опыта в одном районе (в 1937 г.) на новую схему была переведена вся городская сеть (кроме центра города). Работы окончены в 1942 г.

В качестве основного было выбрано напряжение 13,2 кВ. Сеть выполнена воздушной при однофазном распределении. Провод имеет напряжение 7 620 В относительно земли и расположен на вершине столба. Заземленный нейтральный провод находится на той же опоре, ниже, на расстоянии 0,7 м. Он является одновременно нейтральным проводом однофазной сети 240/120 В, выполненной по групповой схеме (рис. 2 *b*); этот же провод используется для заземления кожухов однофазных трансформаторов, укрепленных на столбах. На рис. 6 дан чертеж такой типовой опоры с трансформатором, линейные опоры — такой же конструкции, отличающейся только отсутствием трансформатора. На тех же опорах на стальном тросе подвешен кабель телефонной сети.

К 1942 г. было введено в работу около 800 км сети 13,2 кВ и установлено 2 892 однофазных трансформатора. Трансформаторы защищены плавкими предохранителями, помещенными внутри кожуха. К линии 13,2 кВ они присоединяются без коммутационной аппаратуры, клеммой, которая монтируется и демонтируется под напряжением специальной штангой. Большинство трансформаторов работает параллельно на низком напряжении.

Опыт шестилетней эксплоатации показал, что новая схема очень эффективна в отношении первоначальных затрат и экономии меди и исключает необходимость строительных работ для подстанций, требуя значительно меньше электрооборудования. Однако следует учитывать более

нных двигателей принималось равным 3 В, при 120—240 В и 6 В при 480—460 В. Пусковой ток этих двигателей 20 А при $\cos \varphi = 0,5$.

На рис. 5 даны стоимости потерь энергии в сетях различного выполнения, отнесенные к 1 кВА нагрузки в зависимости от плотности нагрузки. Результаты расчетов показывают значительное преимущество однофазных сетей перед замкнутыми трехфазными сетями при малых и небольших плотностях нагрузок. Экономия на первоначальных затратах и потерях достигает 30%.

Из тех же диаграмм видно, что еще больший экономический эффект получается от перехода с кабельных сетей высокого напряжения на воздушные.

Сделанные выводы подтверждаются опытом работы электросетей города Даллас [Л. 3] (штат Техас), почти полностью переведшего свою распределительную сеть на однофазный ток. Город Даллас имеет 350 000 жителей и является торговым, промышленным и

высокую стоимость трансформаторов 7 кВ по сравнению с 4 кВ.

Система оказалась весьма надежной в эксплуатации, колебания напряжения небольшими (только на двух фидерах пришлось поставить регуляторы напряжения), потери энергии оцениваются в 4—4,5%. В отношении стоимости эксплуатации данных нет, в оперативном же отношении персонал не замечает особенной разницы между новой и прежними системами.

Для защиты (на высоком и низком напряжениях) широко применяются плавкие предохранители, координированные между собой и с выключателями фидеров.

В сети высокого напряжения в ряде случаев их установлено до 5 последовательно. Применяются предохранители с трехкратным автоматическим повторным включением. Выключатели фидеров также оборудованы трехкратным повторным включением. Первое обратное включение производится раньше, чем успеет расплавиться предохранитель на ответвлении или секционный. В 1942 г. было зарегистрировано 197 таких повторных включений выключателей, из которых 93 оказались удачными.

Однофазная система распределения электроэнергии начала применяться в городах после того, как опыт ее применения для сельскохозяйственной электрификации оказался очень успешным. Там же была проверена возможность применения нейтрального провода, общего для высокого и низкого напряжения, а также целесообразность использования одного заземления в качестве рабочего (для заземления нейтрали), в качестве заземления безопасности и для заземления аппаратов защиты от перенапряжений.

В этом отношении представляет интерес схема сети, изображенная на рис. 7. Эта схема [Л. 4] электроснабжения поселков и ферм, расположенных вдоль линии Центральной Иллинойской железной дороги.

Основная линия электропередачи имеет напряжение 22 кВ, нейтраль заземлена. Для электроснабжения поселков с относительно большой плотностью нагрузки применяется напряжение 2,3 кВ с заземленной фазой; для ферм, расположенных не дальше 3 миль, применяется однофазный ток 2,3 кВ, для более удаленных ферм (далее 4 миль)—однофазный ток 13 кВ. Нейтральный провод сети 22 кВ используется во всех напряжениях; он является фазным проводом в трехфазной сети 2,2 кВ, обратным заземленным проводом в однофазных сетях 13 и 2,2 кВ и нейтральным зануленным проводом во вторичных сетях. Через этот же провод производится заземление грозозащитных аппаратов. Обращает на себя внимание гибкость схемы вследствие наличия в ней многочисленных ступеней напряжения и возможности выбора этих ступеней в зависимости от характеристики потребителя.

**

В нашей стране развертываются большие работы по дальнейшей электрификации средних и малых городов,

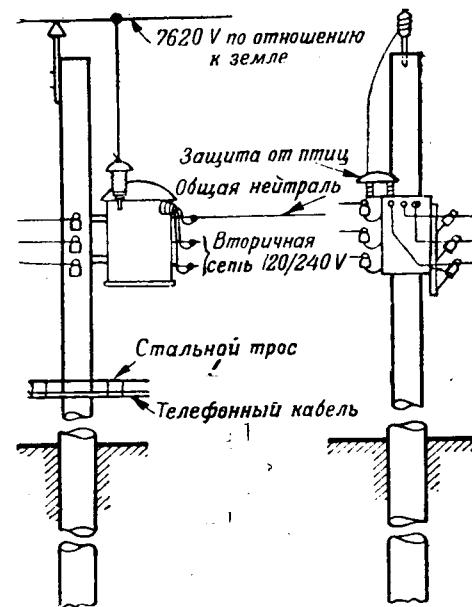


Рис. 6. Типичная опора с трансформатором 7 620/240/120 V.

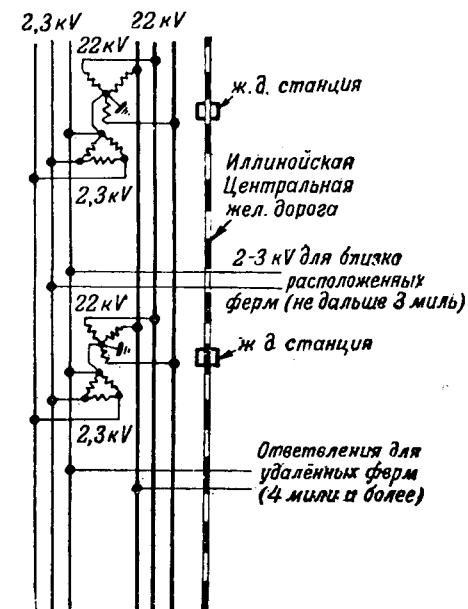


Рис. 7. Схема энергоснабжения населенных пунктов вдоль линии Центральной Иллинойской железной дороги и отдельных ферм вблизи нее.

колхозов и сельского хозяйства. Выбор правильной системы электроснабжения в значительной мере определяет успех дела и размер капиталовложений. Опыт строительства электрических распределительных сетей США представляет определенный интерес и заслуживает внимания и изучения.

Следует отметить, что в шкале напряжений, принятой в СССР, между 10 и 35 кВ нет ни одной ступени, хотя именно в этом интервале находятся напряжения, наиболее распространенные в США. Правила не предусматривают многообразного использования заземленного провода. Наши заводы не производят мелких, особенно односфазных, трансформаторов с большим к. п. д. подобных американским «Spitacore». Не применяются у нас однофазные двигатели, и что особенно важно, отсутствует производство плавких предохранителей, в частности предохранителей, координируемых с защитой выключателей и с многократным повторным включением.

Необходимо обсудить и решить, не следует ли использовать американский опыт и не дает ли отказ от привычных схем и оборудования эффект, значительно превосходящий затраты, связанные с постановкой производства новых типов электродвигателей и защитных устройств. Решение этих вопросов могло бы значительно способствовать строительству экономичных и надежных электросетей в городах и сельских районах СССР.

Литература

1. GER, № 6, 1932.
2. O. B. Falls. Economic Analysis of Overhead Secondary Network Distribution. El. Light and Power, № 2, 1945.
3. H. K. Doyle, W. B. Bullard. Higher Voltage Distribution Successful in Dallas. El. World, № 14 и 16, 1944.
4. El. Light and Power, 72, № 8, 1944.

Проф. П. Г. ГРУДИНСКИЙ

Влияние военных факторов на электрохозяйство Англии

(Обзор)

В течение первого года войны (сентябрь 1939 г.—август 1940 г.) налеты вражеской авиации не причиняли существенного ущерба электрохозяйству Англии, не счи-тая некоторых аварий в сетях. Период более серьезных повреждений начался в сентябре 1940 г. и продолжался до июля 1941 г., о чём свидетельствует динамика выбывшей мощности на электростанциях (табл. 1), а также аварии в сетях в результате военных действий (табл. 2 и 3).

Таблица 1

Динамика выбывшей мощности на электростанциях Англии в результате бомбардировок

| | Бездействую-щая мощ-ность, тыс. kW |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 3/IX 1939 — 31/VIII 1940 | 0 |
| Сентябрь 1940 | 200 |
| Октябрь 1940 | 266 |
| Ноябрь 1940 | 176 |
| Декабрь 1940 | 81 |
| Январь 1941 | 135 |
| Февраль 1941 | 135 |
| Март 1941 | 148 |
| Апрель 1941 | 154 |
| Май 1941 | 190 |
| Июнь 1941 | 185 |
| Июль 1941 | 182 |
| Декабрь 1941 | 73 |
| Март 1942 | 26 |
| Июнь 1942 | 11 |
| Сентябрь 1942 | 45 |
| Сентябрь 1943 | 15 |

В интервалах между приведенными в табл. 1 датами цифры бездействующей мощности изменялись, но никогда не превышали 400 тыс. kW.

Наиболее значительная авария произошла на станции Fulham мощностью 190 тыс. kW, выведенной из строя в сентябре 1940 г. прямым попаданием бомбы в машинный зал.

Повреждения сети «грид» причинялись также средствами защиты; за весь период войны около одной трети всех аварий на линиях передачи, связанных с военными действиями, произошло вследствие бомбардировок, а две трети было вызвано оторвавшимися тросами аэростатов воздушного заграждения¹.

Только 28% общего числа повреждений «грид» вызвало значительные перерывы в электроснабжении, 38% всех случаев относилось к категории небольших аварий, а 34% было ликвидировано без перебоев в электроснабжении.

В распределительных сетях больший ущерб причиняли бомбардировщики, чем аэростаты заграждения (табл. 3).

Повреждения подстанций были немногочисленны и в большинстве случаев не нарушили электроснабжения. Единственный случай полного разрушения металлической опоры в системе «грид» был зарегистрирован в феврале 1944 г.

¹ Подсчеты сделаны по материалам Electrical Times 4/IV 1945 г. По другим данным (Electrical Review от 20/IV 1945 г.) удельный вес повреждений от средств защиты еще более высок: только 14% аварий являлось результатом бомбардировок, 73% падало на долю аэростатов заграждения и 13% на прочие средства обороны (осколки снарядов зенитной артиллерии, низколетающие самолеты и пр.).

Таблица 2
Динамика числа аварий в сети «грид»

| | С 3/IX 1939 г. по 2/IX 1940 г. | С 3/IX 1940 г. по 30/VIII 1941 г. | С 1/IX 1941 г. по 31/XII 1942 г. | С 1/II по 30/IX 1943 г. |
|--|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 1. Повреждения от бомбардировок: | | | | |
| Число аварий | 73 | 426 | 164 | 30 |
| Общая длительность перерыва в электроснабжении в часах | 44 | 185 | 192 | — |
| 2. Повреждения от аэростатов заграждения | | | | |
| Число аварий | 252 | 695 | 221 | 198 |
| Общая длительность перерыва в электроснабжении в часах | 467 | 308 | 348 | — |

Таблица 3
Динамика числа аварий в распределительных сетях¹

| Причины аварий | Число аварий | | | |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | С 3/IX 1939 г. по 2/IX 1940 г. | С 3/IX 1940 г. по 30/VIII 1941 г. | С 1/IX 1941 г. по 31/XII 1942 г. | С 1/II по 30/IX 1943 г. |
| 1. Бомбардировки | 297 | 1 930 | 166 | 93 |
| 2. Аэростаты заграждения . . | 112 | 571 | 170 | 98 |

¹ Включая линии электропередачи, не принадлежащие Центральному электроуправлению.

В период подготовки к войне в Англии был создан фонд резервного электрооборудования, который был размещен в 13 районах. В этот комплект, в частности, входило 94 трансформатора, 350 выключательных устройств, 60 км воздушного высоковольтного провода и 119 км кабеля. Часть этого резерва была использована для проводки линий, связывающих отдельные военные заводы с сетью «грид».

Обусловленное военными факторами перемещение промышленных предприятий из Юго-Восточной Англии на запад повлекло за собой крупные сдвиги в балансе мощностей соответствующих районов. До войны Юго-Западная Англия и Южный Уэльс располагали в зимний период некоторой избыточной мощностью (около 7 тыс. kW), а в юго-восточном районе, наоборот, имел место дефицит мощности (около 96 тыс. kW). Война резко изменила картину: в Юго-Восточной Англии оказалась излишняя мощность (до 292 тыс. kW), которую пришлось передавать в другие районы, а в юго-западный район потребовалась передача дополнительной мощности (до 244 тыс. kW).

Это обстоятельство вызвало необходимость сооружения в 1941—1942 гг. 580 км новых линий электропередачи на 132 kV. Кроме того, за те же годы было построено 115 км линий на 132 kV и около 90 км на 66 kV и 33 kV для снабжения военных заводов. Требуемый провод и металлические опоры были получены из США.

Литература

Electrical Times, 5 апреля, 19 апреля 1945. Electrical Review, 20 апреля 1945, Electrical World, № 7, 1945.

В. И. МИХАЙЛОВ

Новые конструкции высоковольтных и мощных трансформаторов

(Обзор)

Если в трансформаторах на напряжение примерно до 20 кВ расстояние между обмотками высокого и низкого напряжения определяется в основном тепловыми соображениями, то в трансформаторах на более высокие напряжения это расстояние приходится выбирать значительно большим, чем это нужно для удовлетворительного охлаждения активных частей. Определяющим фактором является здесь обеспечение достаточной изоляции.

В настоящее время общепринятой является маслобарьерная изоляция между обмотками, при которой вследствие различия диэлектрических проницаемостей барьера и масла последнее оказывается примерно под двойной электрической нагрузкой по сравнению с барьераами. Это приводит к значительному изоляционному расстоянию между обмотками, которое в современных высоковольтных трансформаторах в конечном итоге и определяет их веса и габариты, если учесть необходимость выдержать напряжение короткого замыкания в определенных пределах.

Пример высоковольтных кабелей заставил рассмотреть возможность отказаться от маслобарьерной изоляции в трансформаторах и использовать для главной изоляции бумагу, пропитанную маслом. По этому пути и пошла фирма BBC (Швейцария).

Заполнение всего промежутка между обмотками бумагой и отсутствие здесь циркуляции масла выдвигает на первый план вопросы диэлектрических потерь в бумаге и теплового пробоя при длительном воздействии напряжения. В связи с этим были проведены обширные исследования.

Оказалось, в частности, что бумажная изоляция, имевшая первоначально сравнительно высокие диэлектрические потери, будучи включена под напряжение, улучшает свои свойства: через некоторое время произведение $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$, характеризующее потери на единицу объема, уменьшилось по абсолютной величине, и снизилась его зависимость от температуры. Было исследовано распределение температуры в функции от времени по сечению бумажной изоляции большой суммарной толщины при ее подогреве с двух сторон. Решающее значение имеет технологический процесс сушки и пропитки бумажной изоляции, а также выбор подходящего сорта бумаги в свете ее диэлектрических свойств. При этом, наряду с абсолютной величиной

$\operatorname{tg} \delta$ при нормальной температуре, не менее важную роль играет зависимость угла потерь от температуры, с которой связано критическое напряжение, определяющее тепловой пробой.

Разработанная конструкция главной изоляции выглядит следующим образом (рис. 1): на сравнительно тонкий бакелитовый цилиндр, надевающийся с небольшим зазором на обмотку низкого напряжения, наматывается бумага шириной больше, чем длина обмоток; суммарная толщина бумажной изоляции выбирается с таким расчетом, чтобы она полностью заполняла пространство между обмотками. Выступающие за обмотку края бумаги надрываются по слоям и отбортовываются, причем внизу это делается до насадки обмотки высокого напряжения, а вверху—после. Практическое применение такой конструкции представляется возможным лишь в том случае, если в отбортованной части через каждые несколько миллиметров закладывать прокладки и тем самым увеличить суммарную высоту отбортовки. В противном случае, если высота отбортовки сохраняется та же, что и толщина изоляции в зоне между обмотками, напряжение перекрытия концевой изоляции получается чрезмерно низким вследствие большой тангенциальной составляющей поля.

Применение такой конструкции позволило уменьшить расстояние между обмотками более чем в два раза. Столь резкое уменьшение главного канала рассеяния дает возможность, сохранив прежнее значение напряжения короткого замыкания, перейти на меньший диаметр сердечника. Таким образом сильно снижается вес активного железа, а также меди, масла и суммарный вес трансформатора. По данным фирмы BBC для трансформатора мощностью 20 000 кВА, 150/20 кВ переход на новую конструкцию изоляции дает следующую экономию материалов по весу: активное железо 36%; медь 13%; масло 19%; вес трансформатора без масла 35%. Уменьшаются также и габариты трансформатора, так что, например, размеры в плане трансформаторов на 20 000 кВА новой и на 10 000 кВА старой конструкции практически равны друг другу. Суммарный вес на 1 000 кВА типовой мощности уменьшается с 2,4 \div 2,7 до примерно 1,5 т.

С 1938 г., когда впервые была введена новая конструкция изоляции, фирмой BBC выпущен целый ряд таких трансформаторов мощностью до 100 000 кВА и на напряжение до 220 кВ.

В сообщениях фирмы нет данных о том, каким образом удалось обеспечить удовлетворительное охлаждение обмоток, и о величине применяемой плотности тока. Можно полагать, что для этого предусмотрены вертикальные каналы, образованные в самих обмотках путем закладывания между витками катушек дистанционных прокладок.

С ростом мощностей и напряжений трансформаторов проблема их транспортировки приобретает серьезное значение. Если до настоящего времени нормально применяемые конструкции магнитопроводов позволяли справлять-

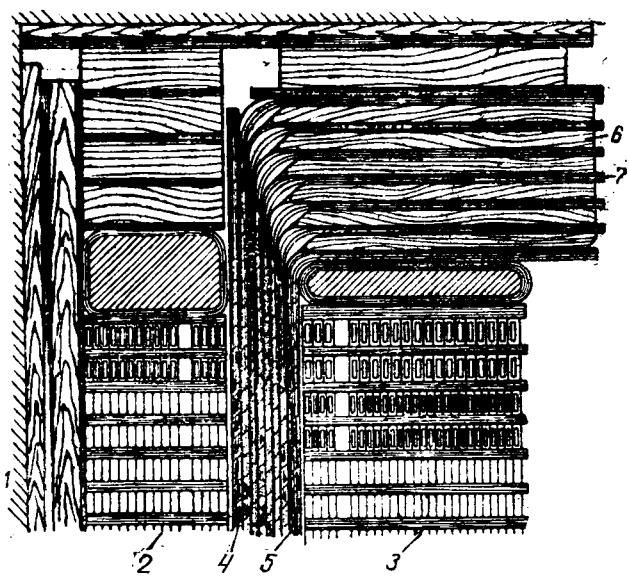


Рис. 1. Новая конструкция главной изоляции трансформаторов фирмы BBC.

1 — магнитопровод; 2 — обмотка низкого напряжения; 3 — обмотка высокого напряжения; 4 — бакелитовый цилиндр; 5 — изоляционная бумага; 6 — прокладка; 7 — отбортовка.

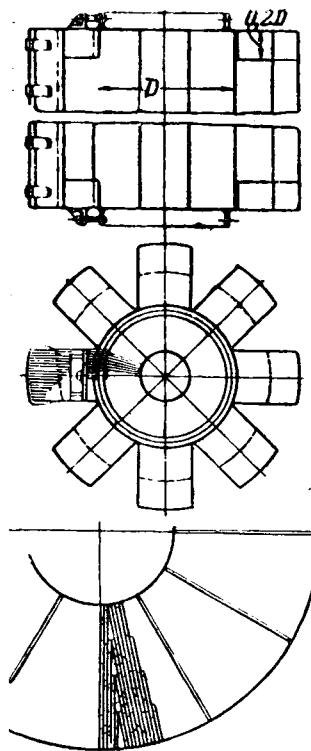


Рис. 2. Сердечник с радиальным расположением листов и боковыми ярмами.

ся с этим вопросом и трансформаторы вписывались так или иначе в железнодорожный габарит (иногда для этого приходилось бак делать с надстажкой, снимаемой при транспортировке), то в будущем при введении напряжений порядка 400 кВ необходимо будет искать новых решений.

В связи с этим фирма BBC решила применить для мощных трансформаторов конструкцию сердечника с радиальным расположением листов стали. Сама идея такого строения сердечника была предложена Веггу еще несколько десятков лет тому назад, однако трудности технологического порядка препятствовали до самого последнего времени ее практическому осуществлению.

В исполнении BBC применительно к однофазным трансформаторам сердечник имеет круглое сечение с круглым охлаждающим каналом в середине (рис. 2). Он собирается из листов различной ширины, образующих секторы и закладываемых в радиальном направлении. По торцам колонны сердечника приварено по одному железному кольцу. Ярма имеют корытообразную форму; к их коротким плечам приварены железные угольники, служащие для крепления ярем на сердечнике. Благодаря большому числу ярем, заполняющих всю окружность сердечника, высота их поперечного сечения сравнительно мала и не превышает 0,2 наружного диаметра сердечника, в то время как в магнитопроводах обычной конструкции высота ярма составляет от 0,5 до 1 диаметра сердечника.

Как показал предварительный проект, магнитопровод новой конструкции позволяет, например, построить однофазный трансформатор мощностью 80 000 кВт на 400 кВ (с одним высоковольтным выводом и глухим заземлением нейтрали), вписывающийся в нормальный железнодорожный габарит.

Помимо мощных трансформаторов разработанная конструкция магнитопровода может быть с успехом применена и для ряда специальных случаев (например, тяговые трансформаторы, устанавливаемые на электрово-

зах) и, в особенности для регулировочных дросселей с регулируемым воздушным зазором.

При параллельном расположении листов магнитопровода приходилось воздушный зазор разбивать на ряд мелких зазоров; вблизи зазора магнитные силовые линии частично выходят поперек листов и приводят к тем большим вихревым потерям, чем больше воздушный зазор. При таких условиях регулирование тока в дросселе можно было осуществить лишь за счет изменения индукции, т. е. числа витков обмотки, посредством переключения ответвлений.

При радиальном строении сердечника можно строить большие дроссели с одним воздушным зазором, так как выступающие у края зазора силовые линии везде выходят лишь через узкие стороны листов, а не поперек листов. Плавное регулирование тока может быть осуществлено путем изменения ширины зазора.

Большое количество таких дросселей мощностью до 5 000 кВт и с регулированием тока до 1:10 находится уже в течение длительного времени в эксплуатации.

Литература

1. А. Мейеггауз. Новые конструкции трансформаторов и дросселей. Brown Boveri Mitteilungen (BVM), стр. 91, № 3, 1945.
2. Г. Вельди. Актуальные изоляционные проблемы в электромашинно- и трансформаторостроении. BVM, стр. 224, № 9/10, 1943.
3. Н. Нартманн. Бумага как высоковольтный изоляционный материал. BVM, стр. 235, № 9/10, 1943.
4. А. Мейеггауз. Мощные трансформаторы легкого веса BVM, стр. 290, № 9—10, 1943.
5. Обзор новых конструкций фирмы Brown Boveri за 1944 г. Трансформаторы BVM, стр. 21, № 1/2, 1945.
6. То же за 1944 г. BVM стр. 26, № 1/2, 1944.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

L. F. Blume, G. Cannilli, S. B. Farnham, H. A. Peterson. Намагничающий ток включения трансформаторов и его влияние на работу сети. AIEE Transactions, стр. 365, v. 63, 1944.

Теоретическая сторона процесса намагничивания трансформаторов в первый момент включения хорошо известна. В то же время имеется мало данных о факторах, определяющих различие токов включения в отдельных трансформаторах, о влиянии конструкции и схемы соединения трансформатора на его ток включения, а также о влиянии на него характеристик сети, питающей данный трансформатор. В реферируемой статье освещаются результаты теоретического и экспериментального исследования этих вопросов.

При стечении ряда неблагоприятных обстоятельств броски тока при включении трансформаторов могут по своей величине приближаться к току короткого замыкания при коротком замыкании на вторичных выводах трансформатора. Они могут вызвать мгновенное снижение напряжения на выводах трансформатора до 20%. Влияние этих факторов может оказаться особенно неблагоприятным в случае защиты трансформатора плавкими предохранителями или некоторыми типами реле, но может повлиять также и на работу двигателей, пусковой аппаратуры и осветительной сети.

При выборе предохранителей для защиты трансформаторов особое внимание должно быть обращено на их характеристику при малых временах и больших токах. Ряд проведенных опытов показал, что при выборе предохранителей, способных выдержать броски тока включения и вместе с тем обеспечивающих достаточную защиту трансформатора и сети, можно по мнению авторов пользоваться следующим простым правилом: характеристика предохранителей должна быть такова, чтобы они в течение 0,1 сек. выдерживали 12-кратный номинальный ток трансформатора.

Возникновение повышенных токов при включении накладывает определенные требования к дифференциальной защите трансформаторов. Неблагоприятного действия снижения напряжения, связанного с включением трансформаторов, на двигатели можно избежать путем правиль-

ного выбора защиты. Мигание ламп осветительной сети требует специальных мер при частых включениях трансформаторов, вызывающих эти явления.

Таким образом, можно считать, что в подавляющем большинстве случаев токи включения трансформаторов не приводят к нарушению нормальной работы сети. Это справедливо также и в отношении трансформаторов, изготовленных с применением современных сортов электротехнической стали, которые при наличии определенных преимуществ приводят к некоторому увеличению токов включения вследствие работы при больших значениях индукции.

Величина тока включения зависит, во-первых, от величины полного сопротивления между источником тока и трансформатором: с повышением полного сопротивления первоначальный бросок тока уменьшается, но при этом возрастает, как показывают осциллограммы, искажение формы волны напряжения на зажимах трансформатора вследствие мгновенного снижения напряжения. В статье приводятся кривые применительно к нормальному однофазному трансформатору, дающие зависимость кратности максимальной амплитуды тока включения от полного сопротивления сети при $R=0$ и $R=X$.

Исследования показали также, что при изменении напряжения сети в пределах от 60 до 130% от номинального, кратность максимальной амплитуды тока включения по отношению к номинальному току трансформатора прямо пропорциональна напряжению. Это объясняется тем, что при значениях остаточного магнетизма и момента включения трансформатора, обусловливающих наибольшее значение тока включения, железо магнитопровода полностью насыщено. Таким образом, то обстоятельство, что большие кратности токов включения в эксплуатации наблюдаются у трансформаторов, установленных на генераторных станциях или вблизи шин подстанций, объясняется не только малой величиной полного сопротивления сети, но и сравнительно высоким уровнем напряжения в этих точках.

В статье приводятся экспериментальные кривые зависимости броска тока и снижения напряжения сети от момента включения, считая с момента прохождения напряжения через нуль.

Исследования по включению соединенной в треуголь-

ник обмотки трехфазного трансформатора в различные моменты времени показали, что обмотка каждой фазы ведет себя аналогично однофазному трансформатору, в то время как зависимость кратности линейных токов включения от момента замыкания контактов имеет более сложный характер. Поскольку линейные токи являются разностью двух фазовых, то их полярность определяется большим из двух фазовых токов; таким образом, при изменении момента включения полярность амплитуды броска тока меняется на обратную в тот момент, для которого два соответствующих фазовых тока включения равны между собой.

Исследования показали, что наибольшие броски тока по отношению к номинальному (линейному) току получаются при соединении первичной обмотки в звезду с заземленным нулем и вторичной — в треугольник, а наименьшие — при соединении первичной обмотки в треугольник, а вторичной — либо в звезду, либо в треугольник.

При включении трехфазных трансформаторов или групп из трех однофазных вполне вероятно, что замыкания всех трех полюсов выключателя не произойдет в точности в один и тот же момент.

При неодновременном включении фаз трехфазного трансформатора ток включения на 10% выше, чем при строго одновременном включении, лишь при соединении первичной обмотки в звезду с заземленным нулем (вторичная — звезда или треугольник). При других схемах неодновременное включение не приводит к повышению броска тока.

С точки зрения уменьшения токов включения целесообразно, таким образом, произвести включение со стороны а) обмотки, наиболее удаленной от сердечника; б) обмотки, соединенной в треугольник (при прочих равных условиях).

Что касается скорости спадания амплитуд токов включения, то исследования с однофазными и трехфазными трансформаторами показали, что для трансформаторов мощностью порядка 1 000 kVA амплитуда намагничивающего тока спустя 10 периодов с момента включения уменьшается примерно до половины своей первоначальной величины. Для более мощных трансформаторов спадание происходит медленнее, для менее мощных — быстрее.

Одним из средств уменьшения бросков тока является включение трансформатора через сопротивление. Был исследован вопрос о влиянии промежутка времени (в электрических градусах) между включением трансформатора через сопротивление и его непосредственным приключением к источнику тока на кратность токов включения. Оказалось, что при промежутках времени примерно до 200° основную роль играет не столько величина сопротивления, сколько сама величина этого отрезка времени. При больших же временах (до 360°), наоборот, величина сопротивления является практически единственным фактором, определяющим бросок тока.

Другим средством для уменьшения токов включения является уничтожение остаточного магнетизма в трансформаторах. Этого можно достигнуть, включив параллельно к трансформатору конденсатор. Тогда при отключении трансформатора возникнет затухающий колебательный процесс, к концу которого остаточный магнетизм в магнитопроводе будет равен нулю. Опыты показали, что для достижения этого остаток конденсатора должна составлять от 40 до 50% от намагничивающей мощности трансформатора.

В конце статьи даются расчетные кривые, позволяющие оценить возможную кратность токов включения в зависимости от мощности и напряжения трансформатора.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

G. Bertola. Усовершенствованная защита трансформаторов с помощью дифференциальных реле с блокировкой от бросков тока включения. *Brown Boveri Mitteilungen*, стр. 129, № 4, 1945.

Для дифференциальной токовой защиты бросок тока намагничивания при включении трансформатора под напряжение равнозначен повреждению в защищаемой зоне. Для предотвращения неправильного действия дифференциальной защиты от токов включения существует целый ряд способов: защита с помощью блокирующих реле, защита с помощью мгновеннов действующих дифференциаль-

ных токовых реле в сочетании с реле времени, защита индукционными токовыми реле с зависимой от тока выдержкой времени. Наконец, для блокировки дифференциальной защиты в момент включения была использована разница в форме кривых бросков намагничивающего тока и тока короткого замыкания в части относительной величины и быстроты затухания апериодической составляющей и содержания высших гармоник. Все эти способы имеют свои недостатки.

В последнее время фирмой Brown Boveri (Швейцария) разработан новый тип дифференциального токового реле, нечувствительного к токам небаланса, обусловленным толчками тока намагничивания трансформаторов и вместе с тем сохраняющего полную чувствительность при повреждениях в защищаемой зоне.

Принцип действия реле основан на том, что кривые токов включения, хотя и имеют достаточно сложные и сильно отличающиеся друг от друга формы, в то же время имеют одно общее: амплитуды полуволн, лежащих по одну сторону нулевой линии, всегда значительно меньше, чем у лежащих по ее другую сторону. Действие такого тока на крутящий момент реле, через которое протекает ток, аналогично действию тока, пульсирующего с половинной частотой. В новом реле это явление используется таким образом, что к нормальному дифференциальному реле добавляется устройство, заставляющее его подвижную систему путем резонанса вибрировать под действием импульсов крутящего момента половинной частоты. При нормальном процессе включения эти вибрации делятся столько же времени, сколько и толчки тока, и тем самым не дают возможности контактам реле замкнуться на время, необходимое для отключения выключателя. Если же при работе или при включении трансформатора произойдет короткое замыкание, то контакты реле под преобладающим действием промышленной частоты мгновенно замыкаются и отключают выключатель с выдержкой времени порядка 0,1—0,15 сек.

Трансформаторы тока не влияют на явление, на котором основано действие нового реле. Это явление может иметь место и при несимметричных токах короткого замыкания, однако, в этом случае оно затухает уже спустя несколько полупериодов и поэтому вызывает лишь незначительное увеличение времени выключения. Нормальная работа реле не нарушается при колебаниях частоты в сети, превышающих $\pm 15\%$ от номинальной.

Испытания нового реле в эксплоатационных условиях применительно к трансформаторам различных мощностей и в различных сетях показали, что оно удовлетворяет всем требованиям.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ АППАРАТУРА

H. L. Byrd and Ben S. Beall. Трехпериодный воздушный выключатель 3 500 000 kVA. *El. Eng. Tr.*, стр. 229—232, № 5, 1945.

В настоящее время уже имеется некоторый опыт эксплоатации выключателей воздушного дутья, установленных на открытых подстанциях 138, 69 и 34,5 kV, и можно судить о достоинствах гашения дуги воздушным дутьем. Наряду с этим обнаружились недостатки механической конструкции и электрической изоляции первых воздушных выключателей, устранение которых не представляет особых трудностей. Фирмой GEC построен новый выключатель воздушного дутья на 138 kV с отключающей способностью 3 500 000 kVA, временем отключения — 3 периода и временем повторного включения — 20 периодов, считая от момента оживления током катушки отключения и до восстановления цепи.

Принципиальная схема воздушного выключателя дана на рис. 1 и 2. Каждый полюс выключателя состоит из фарфоровой камеры гашения, установленной на трех опорных изоляторах, и внешнего разъединителя. В камере отключения находятся два трубчатых подвижных контакта, которые образуют электрическую цепь, соприкасаясь с неподвижным контактом, расположенным в центре камеры. Неподвижный контакт имеет центральное цилиндрическое отверстие. Трубчатые контакты нормально замкнуты под действием пружин. Подвижные контакты снабжены поршнями, которые раздвигают их, скимая пружины, когда сжатый воздух поступает в камеру. Кажд-

дый контакт отодвигается на 20 см от центрального неподвижного контакта. Последовательность операций при отключении выключателя следующая: а) с нижнего конца камеры, через один из опорных изоляторов, поступает сжатый воздух и следует вверх, через специальные ходы, заполняя верхнюю и нижнюю половины камеры; б) поршни под действием давления воздуха раздвигают подвижные контакты; при этом открываются выхлопные отверстия в неподвижном контакте; в) между раздвигающимися подвижными контактами и центральным неподвижным контактом растягиваются две дуги; г) поток воздуха отрывается обе дуги от неподвижного контакта так, что образуется одна дуга между двумя подвижными контактами; д) разрыв происходит при первом прохождении тока через нуль, после того как контактные трубы выйдут из области горловины сопел, расположенных перед неподвижным контактом; поток воздуха в этот период достигает максимальной интенсивности.

Каждая фаза выключателя управляет индивидуальными вентилями дутья, управляемыми электрически. Контакты начинают расходиться приблизительно через 1—1½ периода после того, как соленоид отключения оживляется током, и достигают конца области горловины сопел приблизительно через 2½ периода от момента оживления током соленоида.

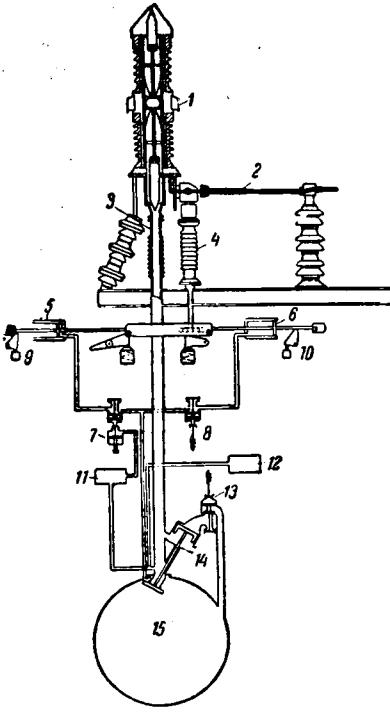


Рис. 1. Схема конструкции одного полюса выключателя.

1—камера гашения; 2—внешний разъединитель; 3—воздухопровод; 4—вращающаяся колонка; 5—цилиндр отключения; 6—цилиндр включения; 7—вентиль, управляющий отключением; 8—вентиль, управляющий включением; 9—буфер отключения; 10—буфер включения; 11—блокировка разъединителя; 12—пневматическое реле повторного включения; 13—вспомогательный вентиль управления дутьем; 14—главный вентиль управления дутьем; 15—воздушный баллон.

Действие ножа разъединителя пневматически связано с работой камеры гашения. Имеется специальная блокировка, предотвращающая действие разъединителя, если не открылись вентили дутья всех трех фаз выключателя. Вентиль, открывающий нож разъединителя, работает пневматически, когда впускается воздух в выключающий цилиндр. Выключающий поршень разъединителя двигает три рейки, которые сцеплены с зубчатками на нижних концах вращающихся изоляторов трех фаз, не-

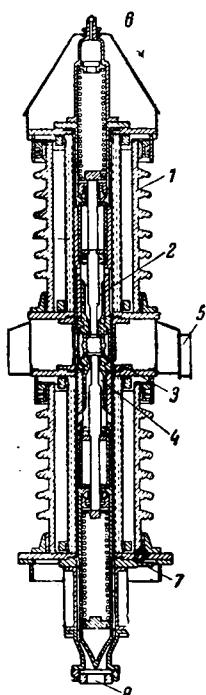


Рис. 2. Разрез камеры гашения.

1—цилиндр; 2—подвижный трубчатый контакт; 3—неподвижный контакт; 4—горловина сопла; 5—выхлопное отверстие; 6—верхний контакт; 7—нижний контакт; 8—впуск воздуха.

сущих ножи разъединителя. После отключения разъединителя впуск воздуха прекращается и контакты выключателя возвращаются в нормальную замкнутую позицию.

При нормальной операции включения действует только разъединитель. Время включения составляет около 20 периодов. Конструкция контактов разъединителя очень надежна. Обгорание почти полностью устранено и часть контактов способны служить после включения 25 000 А.

Быстрое повторное включение производится подвижными трубчатыми контактами. Вентили дутья открываются, как при нормальном отключении, и тотчас же закрываются, вследствие чего подвижные контакты замыкаются под действием пружин и восстанавливают цепь. При первом действии цикла повторного включения разъединитель заблокирован в неподвижном положении. Реле повторного включения управляет пневматически. Цепь катушки отключения разрывается в тот момент, когда контакты выключателя достигают своего крайнего положения расхождения. Контакты выключателя замыкаются приблизительно через 14 периодов после начала цикла. Если повреждение сохраняется и цепь отключения оживляется током снова, то выключатель отключается уже нормальной операцией с действием разъединителя. Выключатель работает с замечательным постоянством времени отключения в пределах от 2,25 до 2,95 периодов в зависимости от первого прохождения тока через нуль, после того как контакты покинут область горловины сопла. Отключающая способность выключателя не снижается при уменьшении напряжения со 132 до 14,2 кВ.

Кандидат техн. наук Г. С. БОРЧАНИНОВ

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

J. T. Rettaliala. Турбовоз с газовой турбиной и электрической передачей. Allis Chalmers, El. Rev., стр. 20—25, № 3, 1945.

В последнее время идея применения газовой турбины для железнодорожных локомотивов привлекает к себе внимание многих локомотивостроительных фирм. Фирма Allis Chalmers разработала локомотив с двумя газовыми турбинами мощностью по 2 400 л. с. каждая. В турбовозе применена электрическая передача мощности от турбины к движущим осям, подобная передаче, применяемой в тепловозах. Локомотив мощностью 4 800 л. с. весит около 200 т.

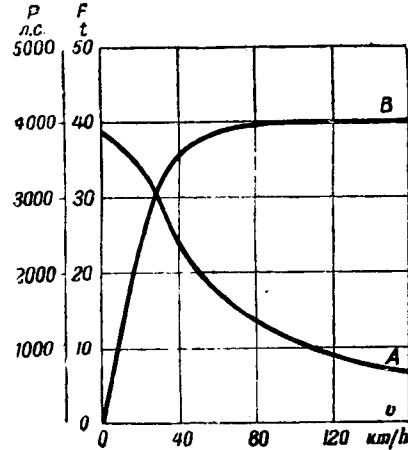


Рис. 1. Тяговые характеристики турбовоза. А—сила тяги на ободе колес; В—мощность на рельсах.

Тяговая характеристика локомотива изображена кривой А на рис. 1. Максимальное пусковое усилие равно 38,5 т, что соответствует коэффициенту сцепления $\mu = 0,25$. Максимальная скорость турбовоза равна 160 км/ч. Кривая В на рис. 1 изображает полезную мощность на рельсах. Из кривой видно, что для широкого диапазона скоростей может быть использована полная мощность турбии-

за вычетом потерь в передаче и мощности, расходуемой на вспомогательные механизмы.

На рис. 2 изображена характеристика экономического к. п. д. турбовоза или, как обычно называют его американцы, к. п. д. на рельсах, в зависимости от скорости при движении с поездом весом 1 000 т. Кривая AB представляет собой к. п. д. турбовоза при работе одной турбины, кривая CE — к. п. д. турбовоза при одновременной работе обеих турбин. Разница объясняется тем, что к. п. д. турбины быстро падает с уменьшением нагрузки. Поэтому при неполной мощности обеих турбин к. п. д. ниже, чем при предельной нагрузке одной турбины. Если при скорости движения ниже 112 km/h работает одна турбина, а вторая нагружается только при скорости выше 112 km/h, то к. п. д. будет изменяться по кривой $ABDE$, что является наиболее экономичным методом работы. Максимальный к. п. д. турбовоза равен 16,8%.

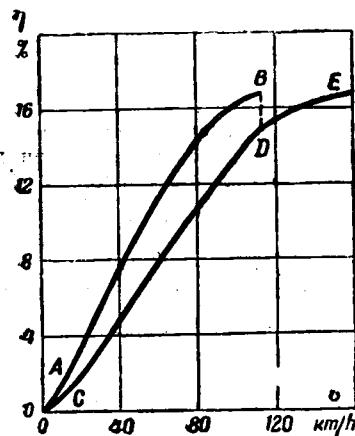


Рис. 2. Экономический к. п. д. турбовоза.

Преимущество локомотива с газовой турбиной в сравнении с паровозом: отсутствие расхода воды, более высокая экономичность, низкие эксплоатационные расходы. Недостатком является потребление жидкого топлива, однако ведутся работы по применению угля вместо нефти. По экономичности турбовоз, однако, значительно уступает тепловозу.

Кандидат техн. наук А. Д. СТЕПАЧОВ

PA3HOE

Robert S. Goodyear. Термисторы. *Product Engineering*,
сстр. 93—95, № 2, 1945.

Металлические окислы относятся к классу полупроводников, отличающихся высоким отрицательным температурным коэффициентом электрического сопротивления. Изготовленные в виде дисков, стержней или маленьких шариков, эти металлические окислы используются в электрических цепях как элементы, сопротивление которых меняется с изменением температуры. Некоторые типы таких элементов изменяют свое сопротивление при комнатной температуре на 5% при изменении температуры на 1°C .

ной температуре на 5% при изменении температуры на 1°C. Элементы сопротивлений с такими свойствами, называемые терморезисторами или термисторами, обладают устойчивой характеристикой и большим сроком службы.

Автор различает три способа нагрева термисторов: а) внешний, когда сопротивление термистора изменяется с изменением окружающей температуры; б) прямой, когда термистор нагревается проходящим через него током цепи, в которую он включен; в) косвенный, когда термистор нагревается от соприкасающейся с ним отдельной нагревательной катушки, включенной в цепь вспомогательного тока.

Термисторы с прямым нагревом находят применение в осцилляторах, в приборах для измерения мощности в цепях высокой частоты. Они применяются как реле времени с выдержкой от нескольких мес до 30 мес и находят различное применение в мостиковых схемах. Термометры сопротивления, в которых используются термисторы как измеряющий элемент, дают значительно большую точность, чем термопары. Термисторы в подобных мостиковых схемах могут быть использованы как измерители потока или как вакуумметры.

Термисторы с прямым нагревом, включенные последовательно с обмоткой стандартного реле, защищают его от ложного срабатывания, обычно вызываемого резкими перенапряжениями в цепи. Термисторы с внешним нагревом могут быть использованы как температурные компенсаторы в любых электрических цепях с положительным температурным коэффициентом сопротивления. При этом термистор включается последовательно в цепь, и сопротивление всей цепи поддерживается постоянным на всем диапазоне окружающей температуры. Термисторы с косвенным нагревом могут быть использованы как приборы переменного сопротивления, дистанционно управляемые вспомогательным током, который пропускается через нагревательную катушку.

В статье приводится ряд кривых, характеризующих работу термисторов.

Инж. П. Л. ХАЙНЕР

По страницам технических журналов США*

Опубликованы результаты исследования экономически выгодных перегревов обмоток асинхронных двигателей (El. Eng., стр. 210, июнь 1945). Новый электроизоляционный материал типа «силикон» позволяет допускать в машинах огромные перегревы, однако имеется ряд факторов помимо изоляции, которые заставляют ограничить допустимые перегревы. Пределы мощности машины в этом случае в значительной степени лимитируются: электрически — опрокидывающим моментом, механически — размером вала и подшипников, экономически — коэффициентом полезного действия.

Авторы приходят к выводу, что оптимальный перегрев для длительно работающего асинхронного двигателя независимо от применяемых изоляционных материалов должен находиться в пределах 80°C . При этом они исходят из следующих соображений.

Смазка подшипников быстро разрушается при температуре выше 80 — 90°C . Обычно считают, что для стандартных асинхронных двигателей перегрев подшипников равен половине перегрева обмотки. Поэтому, если избегать специального устройства для охлаждения подшипников, то при окружающей температуре, равной 40°C , перегрев обмотки не должен быть выше 80°C . Есть, однако, надежда на то, что будет разработано синтетическое смазочное вещество, которое сможет выдержать более высокую температуру.

Кроме вопроса о предельно допустимой температуре смазки необходимо учесть, что переход на большие перегревы, т. е. на большую мощность в единице, потребует увеличения размеров подшипников и вала во избежание механических повреждений.

Другим ограничением для повышения перегревов в машине является низкая температура плавления некоторых металлов, применяемых в электромашиностроении.

Оловянные припои и обычные баббиты теряют свою прочность при температуре порядка 150°C . Отдельные закаленные детали, например в шарикоподшипниках, теряют свою твердость при температуре в 200°C . Чистая медь при наличии механических напряжений становится хрупкой при температуре выше 160°C . Остается применение серебряных баббитов, медно-серебряных антифрикционных сплавов для подшипников и др. при повышении перегрева обмотки, что может оказаться неэкономичным.

Другим существенным обстоятельством, подлежащим учету при повышении перегревов, является разница в температурном расширении меди, железа и изоляции, которая может привести к трещинам в изоляции. Этот фактор, по мнению авторов, является лимитирующим в турбогенераторах при перегревах еще ниже 100°C , но в малых двигателях играет небольшую роль.

Потери в железе при повышении перегревов несколько уменьшаются, так как повышается удельное сопротивление железа. Это обстоятельство, однако, играет малую роль, так как удельное значение потерь на токи Фуко по отношению к общим потерям в машине невелико. Так, например, увеличение перегрева с 60 до 120°C снизит потери в железе обычного асинхронного двигателя меньше чем на 10% , т. е. повысит к. п. д. примерно на $1/3\%$. Потери в меди с увеличением перегрева увеличиваются, поэтому при переходе от перегрева меди в 100°C на перегрев в 160°C требуется при заданном к. п. д. увеличить сечение меди на 18% . В противном случае к. п. д. в обычном асинхронном двигателе снизится на $1\frac{1}{2}\%$.

Увеличение сопротивления меди с увеличением температуры приводит к тому, что при повышении перегрева

допустимая относительная перегрузка уменьшается. Так, например, двигатель с нормальным перегревом в 60°C будет иметь при перегрузке в 25% перегрев, равный $1,25^2 \cdot 60 = 94^{\circ}\text{C}$, в то время как двигатель с перегревом в 120°C при номинальной нагрузке будет иметь при перегрузке в 25% перегрев, равный $1,25^2 \cdot 120 = 188^{\circ}\text{C}$. Это увеличение нагрева вызывает повышение сопротивления с постепенным дополнительным ростом температуры, который может продолжаться в отдельных случаях весьма долго, вызывая неустойчивую температуру, доходящую до опасных величин.

Считается, что жизнь органической изоляции уменьшается наполовину при каждом увеличении перегрева на 10°C , поэтому, даже если у двух машин *A* и *B* изоляция машины *B* имеет при нормальном перегреве в 160°C одинаковую длительность жизни по сравнению с изоляцией машины *A*, имеющей нормальный перегрев в 100°C , то при перегрузке в 25% продолжительность жизни изоляции машины *B* (перегрев в 25% соответствует температуре 285°C) будет составлять только небольшую часть продолжительности жизни машины *A* при аналогичной перегрузке в 25% (температура 147°C).

Авторы произвели исследование относительной стоимости машины с учетом потерь в эксплуатации и стоимости амортизации машины для одного типового асинхронного двигателя мощностью в 30 kVA . При этом был произведен ряд расчетов, в которых отношение длины двигателя к диаметру было принято постоянным, вес двигателя считался пропорциональным кубу диаметра, величина воздушного зазора выбиралась пропорционально корню квадратному из диаметра двигателя, максимальный врачающий момент оставался постоянным. Магнитная индукция в зубцах и спинке статора сохранялась постоянной, потери в железе, потери на вентиляцию и трение считались постоянными. Коэффициент заполнения пазов статора считался постоянным для перегревов до 60°C (предполагалось применение изоляции класса *A*) и менялся скачком при перегреве в 60°C (переход на класс *B*). Предполагалось, что перегрев двигателя прямо пропорционален греющим потерям и обратно пропорционален квадрату диаметра двигателя. Срок продолжительности жизни двигателя при номинальном перегреве был принят в 7 лет; при этом для оценки перегрева было принято, что машина 2 часа в день работает с нагрузкой, составляющей $3/4$ от нормальной, 4 часа в день с номинальной нагрузкой и 2 часа в день с нагрузкой в $5/4$ от номинальной.

Авторы приняли, что увеличение температуры, необходимое для уменьшения срока жизни изоляции наполовину, составляет при номинальном перегреве в 50°C — 10°C , при номинальном перегреве в 60°C — 12°C , при номинальном перегреве в 100°C — 15°C , и при номинальном перегреве в 200°C — 25°C .

В результате расчетов было установлено, что относительная стоимость машины с учетом первоначальных затрат, капитализированных потерь и стоимости амортизации мало изменяется при номинальном перегреве, находящемся в пределах 60 — 80°C , и быстро возрастает при дальнейшем увеличении номинального перегрева.

Авторы также исследовали экономическую целесообразность установки дополнительного вентилятора и пришли к выводу, что в рассматриваемом случае применение добавочного вентилятора оказывается невыгодным уже при перегреве выше 60°C .

Интересен ряд соотношений принятых авторами при проведенном рассмотрении: стоимость подшипников, вала и механической части принята для двигателя, имеющего перегрев в 50°C , равной 25% от общей стоимости машины.

* Печатается в сборниках завода «Электросила» им. Кирова.

ны. Остальные 75% стоимости двигателя авторы считают пропорциональными кубу диаметра.

Дополнительную стоимость изоляции класса В, применяемой начиная с перегрева в 60° С, авторы оценили в 22% от стоимости двигателя, имеющего номинальный перегрев в 50° С. Один kW потерь оценивался как первоначальная затрата в 40 долларов. Эта величина была получена, исходя из времени использования машины, равного 2 000 ч в год, при стоимости 1 kWh в 0,5 цента. Стоимость вентилятора для двигателя с номинальным перегревом в 50° С была принята равной 5% от суммы первоначальных затрат. Отвод тепла вентилятором принимался пропорциональным корню четвертой степени из стоимости вентилятора.

В США разработаны новые устройства для измерения напряжения во вращающихся валах. Одно из таких устройств (Electronics, стр. 114, июль 1945) применяется для измерения механических напряжений во вращающихся валах, исследования вибрации, оценки предела усталости и прочности металла, измерения вращающего момента и др. Устройство основано на принципе изменения электрического сопротивления при изменении давления. Как известно, электрическое сопротивление гранулированного угля резко меняется с изменением давления. Поэтому в первых устройствах применялись свинцово-угольные полоски, прикреплявшиеся к валу и менявшие свое электрическое сопротивление при небольших деформациях вала. Тот же эффект имеет место в металлической проволоке. Когда металлическая проволока растягивается, она становится тоньше и длиннее и ее электрическое сопротивление увеличивается.

Действительное увеличение сопротивления обычно несколько больше, чем величина, рассчитанная по изменению размеров. Этот эффект в металлической проволоке был применен для измерения механических напряжений в 1938 г. Симонсом в Калифорнийском технологическом институте и Форестом в Массачусетском технологическом институте и затем был использован для промышленного применения.

Активным элементом такого устройства является металлическая проволока диаметром в 0,28 мм, сложенная в многократный зигзаг и смонтированная на бумаге для прикрепления к испытуемому образцу.

Изменение электрического сопротивления проволоки, пропорциональное механическому напряжению проволоки, может быть использовано как при растяжении, так и при сжатии проволоки. В зависимости от величины, которую необходимо определить — опорное давление, изгибание или вращающий момент — измерительный элемент устанавливается вдоль оси вала, тангенциальную или под некоторым углом к оси вала. Для измерения постоянного механического напряжения измеряющий элемент включается в схему моста Уитстона. Для измерения переменного механического напряжения применяется потенциометрическая схема. Показания измеряющих элементов могут быть зафиксированы.

Помощью новых рентгеновских установок фирмы GEC на 2 млн. V могут быть исследованы стальные поковки весом в сотни тонн, толщиной до 300 т. В новой установке электроны, выходя из нагретого катода после прохождения всех ступеней ускорения, развивают скорость, равную 96% от скорости света (288 km/sec).

Рентгеновское излучение вызывается ударом электронов в медный экран, покрытый вольфрамом.

Ускорение электронов производится 24 ступенями с напряжением на каждую ступень, равным в среднем 83 500 V. Высокое напряжение получается помощью резонансного трансформатора, сооруженного вокруг самой лампы. Трансформатор не имеет железного сердечника. Электронная камера и трансформатор заключены в металлический корпус, наполненный фреоном в целях изоляции.

О перспективах применения атомной энергии на электростанциях опубликованы данные в октябрьском номере журнала Power за 1945 г. (стр. 81).

В качестве котла, в котором вода превращается в пар, может быть использована установка, состоящая из

последовательных слоев графита и урана с каналами для пропускания нагреваемой воды. По другому варианту установка состоит из графитовых блоков с каналами, в которые закладываются урановые стержни в алюминиевых кожухах. Вода пропускается в каналы и проходит в зазоре между алюминиевыми кожухами и графитом.

Скорость распада урана регулируется выдвижением металлических стержней, вставленных в графит и предназначенные для поглощения нейтронов.

По мнению автора, новый котел, использующий натуральный уран, имеет к. п. д. не больше 8%, поэтому, учитывая, что к. п. д. современного котла составляет 80%, один фунт натурального урана (0,454 kg) оказывается при таком использовании эквивалентным 1 т угля.

При применении урана, обогащенного изотопом с атомным весом 235, котел становится компактным и более экономичным, однако стоимость выделения изотопа 235 в настоящее время настолько велика, что в ближайшие несколько лет трудно ожидать конкурентоспособности нового котла по отношению к обычным котлам, за исключением специальных случаев.

Разработка атомной бомбы в США привела к параллельному развитию ряда отраслей техники (Science News Letter, стр. 207, сентябрь, 1945). Широкое развитие, в частности, получила новая электронная техника в высоком вакууме. Разработано свыше 5 000 новых процессов и продуктов в промышленности. Особенно значительны успехи в области насосной техники.

Новые чувствительные приборы для измерения радиоактивности изготавливает фирма Rowe Radio Research Laboratory Co (Чикаго). Прибор замеряет токи от одной миллиардной доли ампера и выше. Для получения широкого диапазона измеряемых токов прибор имеет пять переключений чувствительности. Устройство состоит из двух частей. Каждая часть заключена в стальной кожух шириной 28 см, высотой 20 см и глубиной 20 см. Питание устройства производится от сети переменного тока с частотой 60 Hz с напряжением 115 V.

Фирма GEC строит крупную лабораторию стоимостью в 10 000 000 долларов, предназначенную для исследований в области электроники и производства телевизоров, радиолокационных и подобных устройств.

Территория новой лаборатории займет площадь в 125 акров. Производственная площадь составит свыше 93 000 m².

24 двухсторонних переговора одновременно на одной радиочастоте демонстрировала фирма International Telephone and Telegraph Corporation (Нью-Йорк) в октябре 1945 г.

Экспериментальное устройство использует новый принцип передачи помехой пульсирующей во времени модуляции. Для передачи и приема используются обычные волноводы и антенны. Параболические рефлекторы, имеющие 2,4 м в диаметре, направляют основную волну с частотой в 1 300 млн. Hz. Рефлектор в Нью-Йорке был установлен на 35-этажном небоскребе, рефлектор в Нью-Джерси — на высоких башнях.

Новое устройство сочетает пульсирующую во времени модуляцию с системой электронной селективности, обеспечивающей для каждого канала определенные доли секунды для передачи сигнала.

Сообщается, что новое устройство отличается высоким качеством передачи и приема и значительно более компактно, чем многоканальная система, работающая на разных частотах.

В США построены две аэродинамические трубы для получения сверхзвуковых скоростей воздуха (свыше 330 m/sec). Одна труба построена фирмой Кертис Райт вблизи города Буффало, другая — группой фирм вблизи города Пасадена в Калифорнии. Стоимость постройки каждого туннеля — 2,5 млн. долларов. Трубы имеют диаметр 9,6 м и содержат по 647 m³ воздуха.

В трубах установлены мощные вентиляторы диаметром 6,7 м, имеющие по 16 лопаток и приводимые во вращение электродвигателями мощностью по 12 000 л. с.

В новых трубах можно создать давление, имитирующее стратосферу, вплоть до давления, соответствующего высоте в 10,5 км. Температура может регулироваться в пределах $-40 \div +50^\circ\text{C}$.

Для защиты сверхтвердой инструментальной стали при индукционной закалке разработан метод покрытия стальных инструментов супензией графита в масле. Закалка производится при температуре $1000 \div 1250^\circ\text{C}$ в течение 6—7 сек без опасности окисления.

Ряд металлических инструментов имеет повышенный износ, вызываемый их намагничиванием. Повышение износа вызывается прилипанием металлических частиц к инструменту. С целью уменьшения износа в США применяется специальное устройство для размагничивания сверл, штампов и другого инструмента. Устройство представляет собой соленоид, в который инструмент вставляется и затем медленно вытаскивается.

Разработано новое электроизолирующее покрытие для проводов на базе силиката соды (жидкого стекла) в Чикагском отделении фирмы Western Electric Co.

Жидкое стекло до последнего времени было распространено как дешевый клей и средство для консервирования яиц. Основным недостатком жидкого стекла, пре-

пятствующим его широкому применению в электротехнике, несмотря на высокие электроизолирующие качества, является его хрупкость и гигроскопичность после высыхания.

Изобретатели установили, что если покрыть провод раствором жидкого стекла и затем подогреть, то силикат остается гибким и негигроскопичным. Наилучшие результаты получены для составов, в которых содержание кремния по отношению к соде сравнительно велико.

Широкое применение в США находит склейка дерева новыми сверхпрочными kleями. Новые клеи имеют мало общего с старыми. Некоторые из них имеют в своей основе синтетические смолы, аналогично современным новым пластикам. Казеиновые клеи нашли широкое применение в строительстве домов и в авиапромышленности. Эти клеи схватываются при обычной температуре. Они не влагоустойчивы и покрываются специальными покрытиями, если применяются во влажных местах.

Широкое применение сверхпрочных kleев позволяет в большом объеме использовать изготовление полуфабрикатов для ускорения строительства.

Время схватывания kleев составляет для различных случаев от нескольких минут до нескольких часов. В ряде случаев для схватывания kleев применяется прогрев радиочастотными токами. Машина для высокочастотного нагрева представляет собой коротковолновой радиопередатчик, в котором один из электродов является антенной, другой заземлением.

Инж. Е. Я. КАЗОВСКИЙ



ПОПРАВКИ

В хронике («Электричество», № 2, 1946) на стр. 81, левый столбец, 22-я строка сверху следует читать: «Должна быть повышена стойкость кабелей...»

В статье И. С. Стекольникова («Электричество», № 3, 1946) на стр. 81, правый столбец, 7-я строка сверху следует читать: «Этот ток получен при напряжении на конденсаторах $U_0 = 61,5 \text{ kV}$.

В заметке Ю. М. Галонена («Электричество», № 3, 1946) на стр. 89, левый столбец, 5-я строка сверху следует читать: «16 декабря 1945 г...»

СПОЛУЧЕСТВО