

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1941



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

2

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Непрестанно работать над усовершенствованием техники	1
✓ <i>Круг К. А. и Петров Г. Н.</i> — Московский энергетический Орден Ленина институт им. Молотова	3
Академик Клавдий Ипполитович Шенфер	8
<i>Минов Д. К.</i> — Боксование электровоза и процессы в электрической цепи тяговых двигателей	9
<i>Борчанинов Г. С. и Ульянов С. А.</i> — К вопросу о реактировании двух фаз фидеров	14
<i>Никитин В. П. и Куницкий Н. П.</i> — Устойчивость и переходные процессы шунтового двигателя постоянного тока	19
<i>Веников В. А.</i> — Изучение электрических систем на моделях с вращающимися машинами	22
<i>Мойжес Л. И.</i> — Компенсированный реактор	26
<i>Гольдфарб Л. С.</i> — Электронно-ионные регуляторы напряжения	33
<i>Москвитин А. И.</i> — Основные проблемы электрических машин прямолинейного движения	41
<i>Раикс И. М.</i> — К преобразованию цепей переменного тока, содержащих взаимную индуктивность и э.д. с.	45
<i>Горушкин В. И.</i> — Применение механического интегратора для исследования динамической устойчивости синхронного двигателя	54
<i>Кантер А. С.</i> — Соединение обмоток генератора переменного тока при намагничивании постоянных магнитов рабочими обмотками	56
<i>Апаров Б. П. и Локшин А. Н.</i> — Критерий устойчивости серий синхронных двигателей при толчках нагрузки	57
<i>Киклевич Н. А.</i> — Метод снятия неустойчивой части пусковой характеристики асинхронного двигателя	59
<i>Извеков Р. Г.</i> — Исправление коэффициента мощности схем газоразрядных ламп	60
<i>Галонен Ю. М.</i> — Энергетическая выставка к 20-летию плана ГОЭЛРО	61
БИБЛИОГРАФИЯ	64
РЕФЕРАТЫ	67

ЖУРНАЛ
ОСНОВАН
В 1880 Г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

2

1941

ФЕВРАЛЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР

Адрес редакции: Москва, Бол. Калужская, дом 67, 1 этаж, комн. 144, тел. В 2-45-63
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648

НЕПРЕСТАННО РАБОТАТЬ НАД УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ТЕХНИКИ

XVIII Всесоюзная конференция ВКП(б) выдвинула перед работниками промышленности и транспорта СССР задачи величайшей хозяйственно-политической важности. Конференция отметила большие успехи, достигнутые нашей страной в экономическом и культурном строительстве и указала наряду с этим на крупные недостатки в работе промышленности и транспорта, со всей большевистской самокритикой вскрыв причины этих недостатков.

В резолюции по докладу тов. Маленкова XVIII Всесоюзная конференция ВКП(б) уделила особое внимание вопросам новой техники и дала директиву «непрестанно работать над совершенствованием техники, над освоением производства новых машин, материалов и изделий». Конференция указала партийным организациям промышленности и транспорта на необходимость самой решительной борьбы с зазнайством и самоуспокоением, с хвостистским, в корне оппортунистическим отношением к новой технике, с консерватизмом, который обрекает предприятия на отсталость и прозябание, подрывает оборонную мощь страны.

XVIII Всесоюзная конференция ВКП(б) отметила ряд серьезных недостатков в работе электропромышленности, электростанций и электросетей.

О том, что в электропромышленности имеются еще люди, пренебрегающие новой техникой, свидетельствуют многочисленные факты. О фактах негодной работы технического совета наркомата электропромышленности сообщалось уже в газ. «Правда». Анкета, проведенная газ. «Правда» среди видных специалистов электромашиностроения и аппаратостроения, показала, что технический совет наркомата электропромышленности оторван от заводов, безучастно относится к техническим проблемам, волнующим работников электропромышленности, не возглавляет борьбы за внедрение передовой техники и технологии.

О недопустимых фактах отставания высоковольтного аппаратостроения сообщалось также неоднократно на страницах печати. Так, например, главный инженер завода «Электроаппарат» тов. Эйдель недавно сообщал следующее:

«Выключатель типа МГФ-11 мы начали разрабатывать еще в 1936 году. Переделывался он несколько раз до 1940 года; а в 1940 году, после выпуска производственной серии этих выключателей в количестве 45 штук, этот выключатель вновь претерпел ряд конструктивных и технологических изменений.

Недопустимо дорогой ценой — затратой почти четырех лет — мы приобрели эту, по нашему мнению, неплохую конструкцию малообъемного выключателя. Такая медлительность освоения характерна и для многих других конструкций, подготовленных заводом. Она в дальнейшем совершенно нетерпима» («Электропромышленность», 24 января 1941 г.).

Наркомат электропромышленности, как это уже отмечалось в журнале «Электричество», не обеспечивает выполнение работ, проводимых под научным руководством Академии Наук СССР, по выбору системы электрической тяги для электрификации железных дорог. Завод «Динамо» им. Кирова в этом отношении предоставлен самому себе и не чувствует помощи и внимания со стороны наркомата. Эти важные для народного хозяйства работы, порученные наркомату правительством, завод вынужден проводить вне плана, только в сверхурочное время, что грозит срывом их выполнения к нужному сроку.

Пренебрежение к запросам развития техники, оторванность от этих запросов проявляются и в наркомате электростанций СССР, что видно хотя бы на примере невероятной волокиты с разработкой правил по устройству заземлений и ряда других новых правил и норм электротехнических установок, в пересмотре и утверждении которых нуждается, в первую очередь, само электрохозяйство. В техническом совете наркомата электростанций много и правильно говорилось о важности разработки проблемы постоянного тока высокого напряжения в перспективе развития электрификации СССР, но ничего не сделано для постановки серьезных исследовательских экспериментальных работ в этой области.

Технический прогресс электропромышленности и электростанций, развитие научных исследований в области электротехники определяются творче-

ством ученых, инженеров, новаторов, изобретателей, стахановцев. Их немало в советской электротехнике.

Так, например, молодые научные работники А. П. Островский и Н. Б. Александров сконструировали электробур. Наркомат нефтяной промышленности и Всесоюзный электротехнический институт (ВЭИ) признали электробур выдающимся изобретением, позволяющим значительно усовершенствовать технику бурения скважин.

Научные работники ВЭИ А. Г. Иосифьян и Д. В. Свечарник разработали оригинальную конструкцию бесконтактных сельсинов для автоматизации процессов производства. Эти аппараты работают безотказно и с большой точностью.

Инж. Ф. Я. Гольдберг (Московская проектная контора «Центроэлектромонтаж») разработал новую систему внутрицехового токораспределения, имеющую большое экономическое значение. Метод тов. Гольдберга был описан на страницах журнала «Электричество» (№№ 5 и 10—11, 1939) и состоит в применении сборных перемещаемых конструкций с железными шинами, которые монтируются на небольшой высоте непосредственно над рядами станков. Шинные сборки целиком заменяют сложные и дорогие распределительные сети, делают систему внутрицехового токораспределения весьма гибкой и дают большую экономию кабеля (около 70 проц.) и цветных металлов (около 50 проц.). За это ценное изобретение инж. Ф. Я. Гольдберг награжден орденом Трудового Красного Знамени.

Широко известна новаторская и изобретательская работа академика К. И. Шенфера.

Изобретенный акад. Шенфером метадин, новый способ управления тяговыми электродвигателями («Электричество» № 1, 1940 г. и ранее), имеет ряд больших технических и экономических преимуществ перед реостатным способом. Изобретения акад. Шенфера позволяют значительно улучшить работу коллекторных электрических машин. Большие заслуги акад. К. И. Шенфера отмечены высокой наградой правительства — орденом Трудового Красного Знамени.

В журнале «Электричество» также отмечалась новаторская работа инж. П. А. Фридкина (завод «Электросила» им. Кирова) и его изобретение — новый безредукторный тип электропривода — сегментный статор. Начальник технического отдела завода «Электросила» инж. Амбарцумов так охарак-

теризовал в заводской газете изобретение инж. Фридкина:

«Новый электропривод принадлежит к тем изобретениям, которые дают новое направление развитию целой отрасли машиностроения. Мы горды тем, что это крупное изобретение нашего советского инженера П. А. Фридкина принадлежит нашей родине, сделано, осуществлено и реализуется на нашей орденоносной кировской «Электросиле».

Эксплуатация электропривода инж. Фридкина в мельничных установках одной из тэц Москвы дала блестящие результаты.

Приведенные отдельные примеры, и в малой степени не исчерпывающие, конечно, списка выдающихся деятелей советской электротехники, должны показать, каким капиталом кадров обладает наша страна для успешного развития и технического прогресса электропромышленности и электрификации в целом. Богатые творческие возможности наших ученых и инженеров еще не использованы в достаточной мере, а они должны быть полностью использованы для блага социалистической родины.

Нужно повседневно помнить и реализовать указание товарища Сталина, сделанное им в докладе на XVIII съезде ВКП(б):

«И чем выше будет у нас производительность труда, чем более совершенствоваться будет у нас техника производства, тем скорее можно будет выполнить эту важнейшую экономическую задачу, тем больше можно будет сократить сроки выполнения этой задачи».

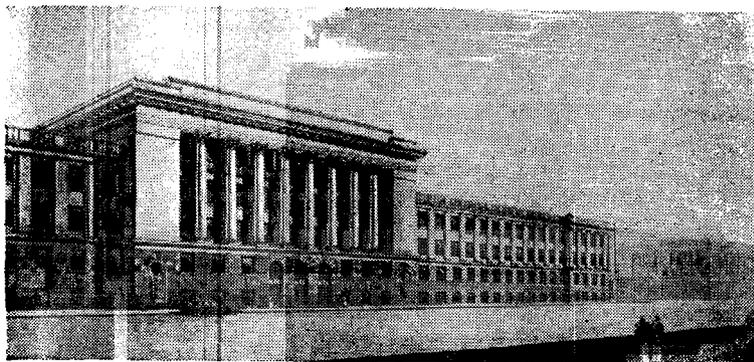
Совершенствовать технику производства, не останавливаясь на достигнутых успехах, постоянно двигать вперед науку, развивать технический прогресс — такова боевая задача работников советской электротехники, являющейся одним из важнейших участков народного хозяйства страны.

Решения XVIII Всесоюзной конференции ВКП(б), с огромным подъемом и энтузиазмом встреченные трудящимися нашей страны, обязывают приняться со всей большевистской настойчивостью за немедленную ликвидацию недостатков в работе промышленности и транспорта для коренного улучшения работы в этой области.

Под мудрым руководством великого и любимого вождя народов товарища Сталина трудящиеся нашей страны добьются новых, решительных побед социалистической промышленности и транспорта.

15 марта с. г. в Ленинграде состоится юбилейное чествование, в связи с 75-летием со дня рождения и 50-летием научной, инженерной, педагогической и общественной деятельности, Михаила Андреевича Шателена, орденоносца, заслуженного деятеля науки и техники, члена-корреспондента Академии Наук СССР, доктора технических наук, профессора Ленинградского Политехнического института им. Калинина, члена Ленинградского городского Совета депутатов трудящихся, председателя Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетики, одного из старейших организаторов и руководителей журнала „Электричество“, учителя ряда поколений советских электротехников.

Редакция и читатели журнала „Электричество“ шлют дорогому Михаилу Андреевичу горячий привет и желают ему здоровья, многих лет жизни и столь же успешной деятельности на благо нашей социалистической родины.



Московский энергетический Ордена Ленина институт им. Молотова

*Член-корр. Акад. Наук СССР К. А. КРУГ
и д-р техн. наук, проф. Г. Н. ПЕТРОВ*

Электротехническое образование в царской России развивалось медленно и слабо. В то время как за границей к концу прошлого столетия во всех промышленных странах уже существовали хорошо оборудованные специальные высшие электротехнические школы или соответствующие электротехнические факультеты при политехникумах, а также большое число средних электротехнических школ, в царской России существовал лишь один электротехнический институт и несколько телеграфных школ, обслуживающих почти исключительно почтово-телеграфное ведомство.

В 1902 г. был основан Петербургский политехнический институт со специальным электротехническим отделением, которое по тому времени было хорошо оборудовано и которое за свое почти сорокалетнее существование выпустило немало видных инженеров-электриков. В тот же период были созданы и другие политехнические институты, как, например, в Киеве и Новочеркасске, где преподавание электротехнических дисциплин было выделено и велось на самостоятельных электро-механических отделениях.

В единственном в то время вузе, обслуживающем огромный центрально-промышленный район, а также, в весьма значительной степени Урал и Сибирь, а именно в Московском высшем техническом училище, преподавание электротехники началось 40 лет назад. В первый период, до революции 1905 г., оно ограничивалось одним курсом общей электротехники в объеме двух недельных часов, который читал Б. И. Угримов, и необязательными лабораторными работами (О. А. Пешель).

Лишь после первой революции, когда была введена так называемая автономия высшей школы, преподавание технических дисциплин в МВТУ было реорганизовано. Были разработаны новые учебные планы с подразделением на специальности, уделено внимание лабораторным занятиям и проектированию. В связи с этим в 1905 г. на механическом отделении МВТУ были введены некоторые дополнительные электротехнические курсы (теория переменных токов, электрические машины и уста-

новки) и создана электромеханическая специальность. К преподаванию электротехники были привлечены новые лица (К. А. Круг и Н. И. Сушкин), и электротехническая лаборатория, помещавшаяся в Физическом институте МВТУ, получила некоторое дополнительное оборудование.

Таким образом в 1940 г. исполнилось 35 лет с того момента, когда в бывшем МВТУ были заложены основы существующего сейчас Московского энергетического института.

Однако до Октябрьской революции развитие электротехнической специализации в МВТУ протекало довольно медленно. Министерство просвещения ставило целый ряд формальных и финансовых затруднений, тормозивших организацию в высшей школе новых специализаций и, в частности, электротехнической.

Немаловажным препятствием в развитии электротехнической специализации являлось и то, что электротехническая подготовка давалась в виде надстройки к общему механическому образованию и требовала от студентов лишнего года пребывания в стенах высшей школы. Лишь в период первой мировой войны в 1915 г. в связи с некоторым подъемом общественной инициативы преподавание электротехники было выделено в самостоятельное отделение и вскоре после этого в самостоятельный электротехнический факультет с соответствующими разработанными учебными планами.

Организация электротехнического факультета была проведена его первым деканом — проф. К. А. Кругом, который стоял во главе факультета вплоть до 1929 г., когда началась реорганизация МВТУ и разделение его на ряд отдельных вузов.

Первые годы существования электротехнического факультета в недрах МВТУ протекали в весьма тяжелых условиях. У факультета не было ни достаточного помещения, ни соответствующего оборудования, ни должного состава профессоров и преподавателей. Факультету пришлось разместиться в тех же помещениях МВТУ. Новое оборудование в этот начальный период достать было трудно. Для того, чтобы хоть как-нибудь сдвинуть

с места преподавание основных электротехнических дисциплин, небольшому наличному составу профессоров (К. А. Круг, К. И. Шенфер, Н. И. Сушкин и Б. И. Угримов) приходилось приниматься за создание и чтение самых разнообразных курсов.

Например, одному из пишущих эти строки пришлось в разное время читать такие курсы, как теорию переменных токов, основы электротехники и электрические измерения, построение синхронных машин, теорию электрических машин, технику высоких напряжений, районные электрические станции, радиотехнику.

После Октябрьской революции перед электротехническим факультетом встали новые задачи.

Переломный период в жизни факультета и начало его быстрого роста совпали с периодом восстановления нашего народного хозяйства и развертывания социалистического строительства. Именно в это время по гениальному замыслу В. И. Ленина был поставлен вопрос об электрификации России, началась работа комиссии ГОЭЛРО.

Работа ГОЭЛРО заставила обратить внимание на постановку у нас электротехнического и энергетического образования. В Москве был основан ряд новых высших электротехнических учебных заведений: электропромышленный факультет Института народного хозяйства им. Плеханова (декан проф. Б. И. Угримов), Московский электротехнический институт, ныне МЭТ (директор проф. В. В. Линде), Учебный комбинат связи им. Подбельского (ректор проф. А. С. Бутягин), электротехнический факультет Ломоносовского института (декан В. А. Александров), Электротехнический институт им. Каган-Шабшай (ректор Я. Ф. Каган-Шабшай).

Наплыв желающих поступить в эти вузы был весьма велик. Так, были годы, когда число студентов, принимавшихся на первый курс электротехнического факультета МВТУ, доходило до тысячи. Однако в практической работе этих вузов, в том числе и электротехнического факультета МВТУ, встречались большие затруднения из-за тесноты и непригодности помещений, отсутствия целого ряда лабораторий и ограниченного контингента преподавательских сил. Основные электротехнические курсы в большинстве этих вузов читались в порядке совместительства одними и теми же лицами, группировавшимися в основном вокруг электротехнического факультета МВТУ, являющегося самым крупным центром электротехнического образования в Москве.

Несмотря на большую поддержку, которую встречал во всех правительственных организациях электротехнический факультет МВТУ, ему никак не удавалось получить новых помещений для своего дальнейшего развития. Тогда проф. К. А. Круг обратился в декабре 1921 г. непосредственно к В. И. Ленину.

В. И. Ленин в то время был болен и находился в Горках. На письменное обращение с просьбой оказать содействие электротехническому факультету МВТУ, а также Всесоюзному электротехническому институту (ВЭИ, тогда Экспериментальный электротехнический институт) и помочь выйти из их тяжелого положения, В. И. Ленин распорядился через управляющего делами Совнаркома, чтобы Комиссия по разгрузке Москвы предоставила указанным двум учреждениям соответствующие помещения и чтобы в случае каких-либо затруднений вопрос об электротехническом факультете МВТУ и ВЭИ был поставлен в Моссовете. Бла-

годаря мощной поддержке В. И. Ленина как электротехнический факультет МВТУ, так и ВЭИ весной 1922 г. получили совместно два дома на Гороховской улице (дом № 23 предоставлен был ВЭИ, а более крупный — № 29 — электротехническому факультету МВТУ); кроме того, было ассигновано около 250 000 золотых руб. на приобретение импортного оборудования. Все это положило прочное основание дальнейшему развитию электротехнического факультета МВТУ и ВЭИ. Первое время эти два учреждения, возглавляемые одним лицом (проф. К. А. Кругом), были теснейшим образом связаны между собой. Большинство сотрудников ВЭИ являлись преподавателями электротехнического факультета МВТУ, и самая большая и по оборудованию самая дорогая в то время лаборатория высоких напряжений ВЭИ была размещена в доме, принадлежавшем электротехническому факультету МВТУ.

Впоследствии, когда ВЭИ получил ряд новых соответственно оборудованных зданий в Анненгофской роще, эта лаборатория со всем оборудованием была передана электротехническому факультету МВТУ.

На базе полученных новых помещений и дополнительного оборудования, создания новых лабораторий, учреждения целого ряда новых кафедр, роста молодых сил и привлечения крупных специалистов извне удалось быстро развить преподавание почти всех областей электротехники и соприкасающихся с ней областей теплотехники и гидротехники.

В 1924 г. по указаниям Госплана в Москве была проведена реорганизация сети электротехнических вузов. Из учебного комбината связи им. Подбельского была выделена та часть, которая давала высшее образование в области связи, и присоединена в виде отделения связи к электротехническому факультету МВТУ. Несколько позже был ликвидирован электротехнический факультет Ломоносовского института с переводом студентов этого факультета на электротехнический факультет МВТУ. Московский электротехнический институт был преобразован в Московский электротехникум (МЭТ). Эти изменения в составе электротехнических вузов Москвы также способствовали укреплению электротехнического факультета МВТУ.

К моменту реорганизации в 1930 г. МВТУ электротехнический факультет стал крупной электротехнической и энергетической школой у нас в Союзе, обеспеченной профессорско-преподавательским составом и имеющей в своем распоряжении достаточные для того времени учебно-вспомогательные учреждения как в области электротехники, так теплотехники и гидротехники. На электротехническом факультете были созданы лаборатории: электроизмерительная, электромашинная, высокого напряжения, электроматериалов, телефонии, телеграфии и радиотехники.

В преподавании основных дисциплин принимали участие следующие профессора и преподаватели: Б. М. Ошурков, Е. А. Глазунов (начертательная геометрия, черчение), П. П. Лазарев, С. И. Вавилов, П. Н. Беликов (физика), Е. Н. Тихомиров (сопротивление материалов), С. К. Руженцев, М. А. Саверин (детали машин), К. А. Круг, В. В. Шулейкин, Н. Н. Луценко, М. А. Перекалин (электротехника), Е. Ф. Комарков (электромашиностроение), К. И. Шенфер, Г. Н. Петров, Б. П. Апаров,

Е. В. Нитусов, А. Н. Ларионов (электрические машины), В. С. Кулебакин (электрические машины и аппараты), М. К. Поливанов, Н. И. Сушкин, А. А. Глазунов, А. Я. Рябков (электрические станции и сети), Л. И. Сиротинский, Б. И. Угримов (техника высоких напряжений), М. В. Шулейкин, И. Г. Кляцкин (радиотехника), Б. Ф. Федоров (светотехника) и ряд других.

Параллельно с электротехническим факультетом МВТУ в Москве организовался еще один крупный электротехнический вуз, а именно электропромышленный факультет института народного хозяйства им. Плеханова. Институт им. Плеханова образовался на базе Московского коммерческого института, в котором электротехника стала преподаваться с 1910 г. В 1921 г. в Плехановском институте электротехнические специальности были сконцентрированы в самостоятельном электропромышленном факультете (декан Б. И. Угримов). Этот факультет ставил своей задачей подготовку инженеров для работы в районном, городском и фабрично-заводском электрохозяйстве, по электрической тяге, производству электровакуумных приборов, кабелей, электроизмерительных приборов и массовой электротехнической аппаратуры.

На электропромышленном факультете были созданы лаборатории: общей электротехники, переменных токов, электрометрии, электромашин высокого напряжения, светотехники, рентгентехники, радиотехники и слабых токов. Лучшее других были оборудованы физическая лаборатория с богатым физическим кабинетом, светотехническая лаборатория, высоковольтная лаборатория, имевшая установку в 1 000 000 V, лаборатория общей электротехники и машинная лаборатория, на базе которых впоследствии была организована в МЭИ лаборатория электрооборудования промышленных предприятий, и в особенности лаборатория переменных токов и электрометрии. Остальные лаборатории были менее значительны. Следует отметить, что на электропромышленном факультете получили свое начало лаборатории теплотехническая и гидротехническая, которыми и поныне пользуется МЭИ.

На электропромышленном факультете имелись следующие профессорско-преподавательские кадры: Н. А. Глаголев (высшая математика), Н. Н. Бухгольц (теоретическая механика), Н. И. Иванов (сопротивление материалов), Л. Г. Кифер (детали машин), Б. И. Угримов (электротехника и техника высоких напряжений), С. И. Курбатов, П. С. Сергеев, Ю. С. Чечет (электрические машины), М. В. Шулейкин (радиотехника), А. П. Иванов, П. И. Мартынов (светотехника), Н. Е. Успенский (рентгентехника) и ряд других.

В начале 1930 г. произошла реорганизация МВТУ. Электротехнический факультет стал самостоятельным вузом — Московским энергетическим училищем (МЭУ) с одновременным образованием из его отделения связи — Московской военной академии связи. В 1930 г. был реорганизован также Институт народного хозяйства им. Плеханова и на базе электротехнического факультета МВТУ, и электропромышленного факультета Плехановского института был образован единый Московский энергетический институт, которому было вскоре присвоено имя председателя Совнаркома СССР Вячеслава Михайловича Молотова. За время своего предшествовавшего существования оба факультета подготовили преподавательские кадры и выпустили около трех тысяч специалистов в различ-

ных областях электротехники и энергетики, из которых очень многие выдвинулись как крупные деятели нашей промышленности и социалистического строительства.

Перед вновь организованным вузом — МЭИ, встали в тот период новые задачи, вытекающие из решений июльского пленума ЦК ВКП(б) 1928 г. о высшей школе и решений ноябрьского пленума ЦК ВКП(б) 1929 г.

В этих решениях остро был поставлен вопрос не только о количестве, но и о качестве специалистов.

Развитие и социалистическая реконструкция промышленности и сельского хозяйства в соответствии с новыми достижениями науки и техники, а также коренная перестройка в связи с этим всего производственного аппарата — требовали нового типа технических руководителей и организаторов промышленности, транспорта, сельского хозяйства и других отраслей социалистического хозяйства. Инженерные кадры должны были обладать достаточными специальными техническими и экономическими знаниями, широким общественно-политическим кругозором и качествами, необходимыми для организаторов производственной активности широких трудящихся масс.

Эти задачи и были положены в основу практической деятельности МЭИ. Для большего сближения молодого инженера с производством, для более быстрого насыщения промышленности квалифицированными кадрами в этот период был проведен переход от более широкой, ранее существовавшей специализации, к более узкой и целеустремленной. В учебных планах значительно был усилен элемент производственного обучения, число специализаций значительно возросло. Этот период был характерен также и тем, что в высшую школу пришли студенты «парттысячи» и «профтысячи», имеющие опыт хозяйственной и организационной работы, из которых высшая школа должна была подготовить инициативных руководителей социалистической промышленности.

Сложность всех этих задач не сразу позволила наладить и правильно организовать учебный процесс. Непрерывная реорганизация учебного процесса мешала работе. Необходимо было создать устойчивые учебные планы и учебники, соответствующие современному уровню науки и техники. Излишняя дробность специализации, в связи с недостаточной подготовкой поступающих во вузы, приводила к тому, что выпускаемого специалиста по квалификации скорее можно было приравнять к технику, чем к инженеру. Сентябрьское постановление партии и правительства 1932 г. вскрыло эти недочеты в работе и поставило перед вузами ряд новых задач.

1932 год явился этапным в истории МЭИ. К этому времени в институте создался крепкий, хорошо спаянный и дружно работающий коллектив квалифицированных специалистов; старые кадры пополнились молодыми — воспитанниками самого института. К этому периоду времени значительно окрепла также и развилась теплотехническая специализация. Начиная с 1932 г., стало намечаться не только непрерывное улучшение и стабилизация учебного процесса, но и постепенное расширение научно-исследовательской работы кафедр. Последнее дало возможность начать планомерную подготовку молодых научных кадров — новой смены для высшей технической школы.

Через научно-исследовательскую работу профессора и преподаватели института тесно связались с нашей социалистической промышленностью. За последние годы коллектив института исследовал и успешно разрешил большое количество технических проблем и вопросов, стоявших перед промышленностью и эксплуатацией энергосистем. Укажем лишь на некоторые работы института: реконструкция схемы управления главным приводом блюминга Магнитогорского металлургического комбината, применение тиристорных для автоматического регулирования напряжения генераторов, исследование схем гашения поля турбогенераторов, исследование магнитного рассеяния трансформаторов, исследование коррозии изоляционных и проводниковых материалов и старения проводниковой изоляции, координация изоляции на подстанциях 6 и 35 kV, расчет линий электропередач в особо гололедных районах, разработка стандартов для расчета токов к. з. и др.

Кафедрой автоматики и телемеханики разработан метод динамической компенсации (доц. Ф. Е. Темников), дающий возможность создания различных комбинированных установок многократного централизованного контроля, регулирования и управления для самых разнообразных технологических процессов.

Заслуживает быть отмеченной большая работа по составлению схемы развития энергохозяйства новых западных областей УССР и БССР, проведенная институтом по поручению Наркомата электростанций СССР. В этой работе приняли участие 5 кафедр института под общим руководством проф. С. А. Кукель-Краевского.

Приведенный выше краткий выборочный перечень далеко не исчерпывает всего многообразия научных работ, проведенных и проводимых в настоящее время кафедрами института.

Наряду с практической учебной и научной деятельностью МЭИ разрешал также ряд принципиальных педагогических и методических вопросов. Следует отметить, что в 1934 и 1935 гг. в МЭИ был проведен ответственный опыт свободного посещения студентами лекционных занятий, что принято в настоящее время во всех вузах Советского Союза. Этот опыт дал вполне положительные результаты и показал, что при правильной организации учебного процесса и достаточной дисциплинированности и сознательности нашей советской молодежи свободное посещение занятий создает необходимые предпосылки для более самостоятельной и эффективной работы студентов во вузе.

Успешная работа МЭИ в этот период времени получила свое отражение на Всесоюзных соревнованиях втузов, организованных ЦК ВЛКСМ, ВЦСПС и газетой «Комсомольская правда», причем в последнем туре этих соревнований МЭИ получил первое место среди втузов и вузов Советского Союза.

Тов. В. М. Молотов, выступая в мае 1938 г. на Первом всесоюзном совещании работников Высшей школы и подводя итоги пройденному высшей школой пути за период с 1932 г. по 1938 г., поставил перед нею ряд новых задач, среди которых одной из важнейших являлось создание новых учебников, соответствующих современному уровню науки, техники и уровню преподавания дисциплин в высшей школе.

Профессорско-преподавательский коллектив МЭИ принял эту директиву главы советского правитель-

ства к неуклонному исполнению и, начиная с 1938 г. по настоящее время, создал ряд новых учебников и учебных пособий, получивших широкое распространение во всех электротехнических вузах Советского Союза.

В этой работе активно участвовали академик К. И. Шенфер, академик М. В. Кирпичев, профессор и доктор технических наук: К. А. Крут, Л. И. Сиротинский, А. А. Глазунов, Г. Н. Петров, С. А. Кукель-Краевский, А. П. Иванов, В. Е. Розенфельд, И. Л. Каганов, доценты М. А. Перекалин, П. С. Сергеев и ряд других.

Последний период в жизни МЭИ характеризуется созданием ряда новых лабораторий. Особенно сильное развитие получили ранее отстававшие — теплотехнические лаборатории. Значительно развилась лаборатория тепловых двигателей, вновь создана лаборатория теплофикации, теоретических основ теплотехники, тепловых измерений. Среди электротехнических лабораторий значительной реконструкции подверглись лаборатории теоретических основ электротехники, радиотехники, автоматики и телемеханики. Заканчивается организация лаборатории электрических станций и сетей.

Значительные трудности в организации учебной работы МЭИ испытывал и испытывает до настоящего времени в связи с неприспособленностью к учебным занятиям занимаемых им помещений и разбросанностью этих помещений по различным районам Москвы. В то же время строительство нового здания движется недостаточными темпами.

Только в 1940 г. небольшая часть нового здания МЭИ вступила в эксплуатацию.

За последнее десятилетие своего существования МЭИ дал стране свыше пяти тысяч инженеров-электриков и теплотехников. В нижеследующей таблице приведен выпуск инженеров по годам (см. стр. 7).

Огромная армия инженеров — воспитанников МЭИ работает в настоящее время в самых разнообразных электротехнических и энергетических предприятиях Советского Союза, активно участвуя в социалистическом строительстве.

Правительство высоко оценило заслуги Московского энергетического института им. Молотова, наградив институт Орденом Ленина и целый ряд работников института — орденами и медалями Союза.

Подводя положительные итоги 35-летнему существованию высшей энергетической школы в Москве, коллектив МЭИ видит также и немало недочетов в своей практической работе и ставит перед собой ряд новых задач, которые должны быть разрешены в ближайшие годы.

Недавние решения правительства о реорганизации режима высшей школы, о перестройке преподавания социально-политических дисциплин, об усилении преподавания иностранных языков и др. — ставят перед высшей школой ряд важнейших задач.

В ближайший период времени следует провести пересмотр учебных планов с целью приведения их в соответствие с новыми методико-педагогическими задачами, стоящими перед высшей школой. Новые учебные планы, по мнению авторов настоящей статьи, должны отразить опыт, накопленный высшей школой за последние годы ее работы; они должны устранить качественную и количественную диспропорцию в общенаучной и специальной подготовке инженера-электрика и инженера-теплотехника; они должны, не снижая теоретической под-

Год выпуска	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	Всего
Число выпущенных инженеров	523	390	495	207	598	669	516	553	189	355	400	5195

готовки инженера, усилить его технологическую подготовку с учетом особенностей тех новых контингентов, из которых формируется в настоящее время высшая школа.

Принцип свободного посещения лекционных занятий, который, надо надеяться, в ближайшее время получит свое дальнейшее развитие, также должен оказать свое влияние на учебные планы. В частности, этот принцип заставит стать на правильный путь более решительной унификации учебных планов отдельных специальностей и специализаций.

В настоящее время лекционное преподавание ряда общенаучных и специальных дисциплин обставлено с технической стороны совершенно недостаточно. Современная техника обладает большими возможностями в отношении повышения наглядности преподавания, исследования отдельных процессов, которые почти совершенно не используются при лекционном преподавании во втузах, ведущемся чаще всего так, как оно проводилось в высшей школе и десятки лет назад. Нужно повысить наглядность преподавания и использовать для целей преподавания достижения современной техники.

Не вполне достаточной является и та работа, которая проведена была до сих пор по созданию новых учебников и учебных пособий. В настоящее время еще далеко не все курсы обеспечены учебниками, т. е. теми элементарными условиями, без которых нельзя правильно организовать самостоятельную работу студента. Учебники не только быстро расходятся, но и быстро стареют в условиях непрерывного роста современной техники, поэтому учебники требуют непрерывного улучшения, и эта работа должна являться органической работой высшей школы.

Ряд новых задач стоит также и в отношении усиления технологической подготовки студентов. Опыт последнего времени показывает, что перенос технологической подготовки исключительно на производственную практику студентов не дает удовлетворительных результатов. Практика студентов на передовых предприятиях советской промышленности должна сочетаться с практической работой студента в специальных мастерских и ла-

бораториях внутри самого втуза. Только при этих условиях можно будет достигнуть правильного понимания со стороны молодых специалистов важности постановки технологических процессов в современном производстве. Вопросы усиления технологической подготовки студентов тесно связаны также с вопросами их экономического образования. Вопросы технологии, вопросы проектирования в настоящее время во втузе еще недостаточно связаны с вопросами экономики. Экономическая подготовка студента оторвана от технической. Нужно органически сочетать эти два элемента учебной подготовки.

Воспитание молодых научных кадров через аспирантуру является не вполне еще решенной задачей. Существующая система подготовки обладает рядом недостатков, которые выявились в практике последних лет. Необходимо аспиранта теснее связать с органической работой кафедры во всех ее звеньях, а это в настоящее время еще не достигнуто.

С подготовкой научной смены тесно связано также развитие научно-исследовательской работы во втузах. Несмотря на значительные успехи, которые достигнуты были в последнее время в отношении расширения научно-исследовательской работы кафедр, все же в настоящее время между научно-исследовательской работой и педагогической существует значительная диспропорция, на устранение которой должно быть обращено серьезное внимание.

Таковы очередные задачи и краткие итоги того пути, который прошла высшая энергетическая школа в Москве за 35 лет своего существования.

Коллектив научных работников, объединенный вокруг МЭИ, провел большую работу по подготовке инженерных кадров для нашей социалистической промышленности и народного хозяйства. Надо надеяться, что укрепление материальной базы института создаст при дружной работе коллектива еще большие возможности для дальнейшего улучшения электротехнического и теплотехнического высшего образования и подготовки инженеров-электриков и теплотехников, способных стать активными участниками грандиозной социалистической стройки нашей родины, проводимой под мудрым руководством великого Сталина.

Академик Клавдий Ипполитович Шенфер

Исполнилось тридцать лет научной и педагогической деятельности одного из выдающихся ученых Советского Союза академика Клавдия Ипполитовича Шенфер.



Научная деятельность Клавдия Ипполитовича охватывает много отраслей электротехники. Основные же его ученые труды относятся к области электрических машин.

Работы К. И. отличаются особой глубиной анализа физических явлений; они тесно связаны с жизнью и отвечают на самые насущные ее требования в области электрических машин.

Разносторонняя плодотворная научная деятельность К. И. богата научно-техническими изобретениями, выдвинувшими его в ряды первых ученых — новаторов техники.

Значительная часть всех ученых трудов К. И. (опубликовано более 80) и изобретений относится к процессам коммутации, являющимися одними из самых важных и сложных в коллекторных машинах постоянного и переменного токов. Его научные исследования в этом направлении послужили основой теории и новых методов расчета коммутации, которые получили распространение и привели к раскрытию им физических явлений при коммутации. В особенности следует отметить ряд изобретений, новых методов и предложений К. И., позво-

ляющих значительно улучшить работу коллекторных электрических машин.

Не менее интересен цикл исследований, проведенных К. И., рабочих процессов в одноякорных преобразователях, коммутации в них и их поведения при внезапных коротких замыканиях.

Цикл крупных трудов К. И. посвящен научному исследованию асинхронных машин. Им разработаны новые способы регулирования и пуска в ход этих распространенных в промышленности электродвигателей и созданы новые конструкции, повышающие их эффективность.

Много труда и внимания акад. К. И. Шенфер уделил и проблемам, связанным с синхронными машинами. Особенно следует отметить его работы по возбуждению и быстрому развозбуждению синхронных машин, а также по синхронно-индукционным двигателям.

К. И. создал новую электрическую машину, позволяющую управлять тяговыми электродвигателями без реостатов.

Клавдий Ипполитович в настоящее время ведет большую плодотворную работу в Энергетическом институте им. акад. Кржижановского АН СССР. Здесь им разрабатывается ряд тем, в частности, направленных к созданию и исследованию оптимальных электрических систем для нужд местной энергетики.

Акад. Клавдий Ипполитович Шенфер известен многочисленной армии наших советских инженеров-электриков, как прекрасный учитель и лектор. Свой тридцатилетний опыт талантливого педагога высшей школы К. И. вложил в учебники и пособия по электрическим машинам постоянного и переменного токов.

Одновременно с научной и педагогической деятельностью К. И. интенсивно вел научно-общественную работу. С первых же дней Октябрьской революции он всю свою неиссякаемую энергию, талант и опыт поставил на службу страны социализма. Он был одним из первых организаторов советской высшей школы, проводил обширную работу по консолидации научных сил на узловых вопросах электромашиностроения. Под руководством К. И. прошел ряд научно-технических конференций и совещаний в различных учреждениях и на заводах. В течение многих лет акад. К. И. Шенфер принимает деятельное участие в работе редакции журнала «Электричество».

Выдающиеся достижения в области подготовки кадров академика Клавдия Ипполитовича Шенфер оценены Правительством высокой наградой — орденом Трудового Красного знамени.

*Акад. Г. М. КРЖИЖАНОВСКИЙ
Акад. В. Ф. МИТКЕВИЧ
Акад. В. П. НИКИТИН
Акад. В. С. КУЛЕБАКИН
Чл.-корр. АН СССР В. И. ВЕЙЦ
Канд. техн. наук М. И. РОМАНОВ*

Боксование электровоза и процессы в электрической цепи тяговых двигателей

Д-р техн. наук, проф. Д. К. МИНОВ

Московский энергетический Орден Ленина институт им. Молотова

Техническая мысль СССР, а также ряда зарубежных стран работает в настоящее время над вопросом лучшего использования электровозов с целью повышения веса поездов.

Настоящая работа преследует цель дать правильную оценку вопросу о повышении тяговых свойств электровоза, учитывая динамические явления и связь между электрическими и механическими процессами в цепи тяговых двигателей при боксовании ската. На основе предлагаемой теории указываются конкретные мероприятия.

Номинальная нагрузка движущей оси $P_{\text{ном}}$ связана с наибольшим тяговым усилием $T_{\text{макс}}$, реализуемым электровозом, следующей зависимостью:

$$P_{\text{ном}} = \frac{T_{\text{макс}}}{\eta \phi N}, \quad (1)$$

где N — число движущих осей; ϕ — физический коэффициент сцепления; η — коэффициент использования сцепного веса.

Для определения коэффициента использования сцепного веса автор предлагает следующее универсальное выражение:

$$\eta = \eta_{\text{ст}} \eta_{\text{дин}} = \eta_{\text{дин}} \frac{1 + \Delta \eta'_1 + \Delta \eta'_2}{1 + \lambda}, \quad (2)$$

где $\Delta \eta_1$ и $\Delta \eta_2$ — относительные отклонения, вызванные допусками и перераспределением давлений при реализации тягового усилия $T_{\text{макс}}$; λ — относительное отклонение тягового усилия от среднего. Индекс¹ (один штрих) отмечает величины, относящиеся к оси, лимитирующей тяговые свойства электровоза¹; $\eta_{\text{ст}}$ и $\eta_{\text{дин}}$ статический и динамический коэффициенты использования сцепного веса электровоза.

Уравнение боксующего ската. При рассмотрении процесса боксования сделаем следующие предположения:

1) Якорь двигателя имеет жесткое соединение со скатом.

2) В боксовании участвует лишь один „лимитирующий“ скат.

3) Боксование вызывается переменной составляющей нагрузки ската вследствие участия электровоза в ряде паразитных движений.

4) В течение рассматриваемого процесса, ввиду его кратковременности, скорость электровоза v заметно не изменяется и принимается постоянной. Напряжение, подводимое к двигателям, также постоянно.

5) Постоянная времени электрических процессов ($T_{\text{э}} < 0,01$ сек) ничтожно мала по сравнению с постоянной времени для механических процессов ($T_{\text{мех}} = 0,5-1$ сек). Поэтому будем полагать, что переходному механическому процессу сопутствует установившийся электрический процесс.

¹ Оси, для которой правая часть формулы (2) дает минимум.

б) Цикл изменения скорости боксующего ската можно разбить на ряд элементов, причем в пределах каждого из них тяговое усилие и коэффициент трения убывают пропорционально скорости скольжения ската v_s .

Согласно этим положениям, формулу для мгновенной нагрузки боксующего ската можно представить в следующем виде:

$$P_l = \eta_{\text{ст}} P_{\text{ном}} + \sum_{q=1}^{v=q} p_q \cos \theta_q - k X F_0 (v_s - v_{s_0}), \quad (3)$$

где

$$\theta_q = \frac{2\pi l}{L_q} + \sigma_q, \quad (3a)$$

l — расстояние боксующего ската от места начала отсчетов; p_q — амплитуда колебаний (kg), L_q — длина волны (m) и σ_q — начальная фаза q -той гармонической составляющей нагрузки ската; v_s — скорость проскальзывания ската (m/sec); F — усилие тяги одной движущей оси (kg) k — отношение вертикальной реакции привода на движущуюся ось к тяговому усилию (при равных двигателях $k=0$); $X = -\frac{dF}{F_0 dv_s}$ (m/sec) — коэффициент жесткости тяговых характеристик, представляющий собой относительное уменьшение тягового усилия, соответствующее приращению скорости скольжения ската в 1 m/sec; $\eta_{\text{ст}}$ — соответствует усилию тяги электровоза: $T = N F_0$.

Кроме того, для дальнейшего имеем: φ — коэффициент трения колес о рельсы. При отсутствии скольжения: $\varphi = \phi$, где ϕ — физический коэффициент сцепления.

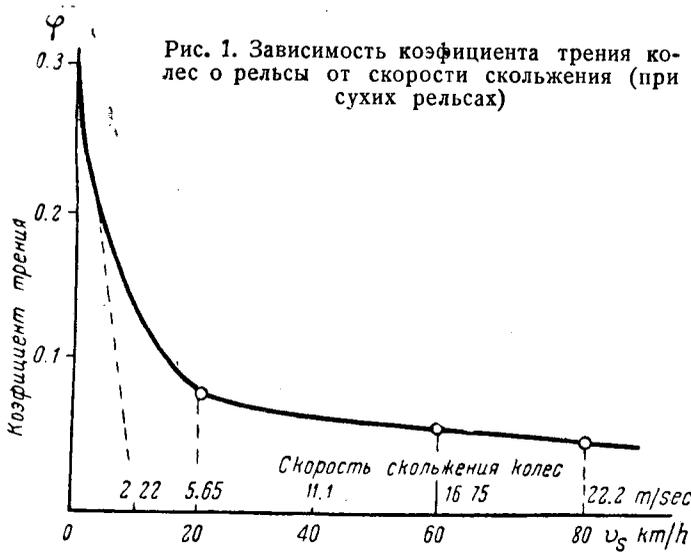
Величины: l , F , v_s , φ , относящиеся к начальному моменту, отмечаем дополнительным индексом „нуль“. При этом тяговое усилие боксующего ската в начальный момент (при $l=l_0$ и $v_s=v_{s_0}$) равно:

$$F_0 = \varphi_0 \left(\eta_{\text{ст}} P_{\text{ном}} + \sum_{q=1}^{v=q} p_q \cos \theta_{q_0} \right). \quad (4)$$

Для выяснения физической стороны явления положим сначала, что нагрузка ската имеет всего одну гармоническую составляющую. Положим далее, что некоторое время скат движется без скольжения, развивая постоянное усилие тяги F_0 . Под влиянием гармонической составляющей скат может разгрузиться настолько, что сила его сцепления с рельсами станет меньшей F_0 . При этом скат начнет боксовать. Примем момент начала боксования за начальный. В зависимости от параметров электрической цепи может случиться: а) что боксование вовсе не прекратится и б) что оно прекратится при $l \leq (l_0 + L)$. В последнем случае боксование носит перемежающийся характер, т. е. оно периодически возникает и затухает в пределах одной волны гармоника нагрузки ската.

В случае наличия нескольких независимых

электрических цепей тяговых двигателей перемежающееся боксование лимитирующего ската повышает среднее тяговое усилие электровоза T_{\max} . Работая на пределе сцепления, электровоз сначала переходит на режим перемежающегося боксования. Когда эта мера оказывается недостаточной, то боксование становится устойчивым,



вследствие чего тяговое усилие электровоза резко падает, что ведет к растяжке состава.

Рассмотрим режим перемежающегося боксования. Мгновенное значение тягового усилия F_l и силы трения между колесами боксующего ската и рельсами S_l согласно положению (6) равны:

$$F_l = F_0 [1 - X(v_s - v_{s_0})], \quad (5)$$

$$S_l = P_l \varphi_0 [1 - \rho(v_s - v_{s_0})], \quad (6)$$

где X , F_0 и P_l были определены выше; ρ — относительное уменьшение коэффициента трения, соответствующее возрастанию скорости скольжения ската на 1 м/сек.

Для суждения о величине ρ следует руководствоваться данными опыта.

Очевидно, что дифференциальное уравнение боксующего ската напишется в следующем общем виде:

$$(F - S)_l \frac{D^2}{4} = I \frac{dv_s}{dt}. \quad (7)$$

При этом момент инерции вращающихся масс, связанных с боксующим скатом, выразится в зависимости от коэффициента инерции вращающихся масс $(1 + \gamma)$ следующим образом:

$$I = \frac{\gamma P_{\text{ном}} D^2}{4g}, \quad (8)$$

где $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ — ускорение силы тяжести; $\gamma = 0,1 - 0,4$; D — диаметр колеса в м.

Подставив в формулу (7) выражение из формул (3) — (6) и (8), получим искомое дифференциальное уравнение в развернутом виде.

До сих пор мы предполагали, что переменная составляющая нагрузки ската имеет всего одну гармонику, при $v_{s_0} = 0$. Очевидно, что эти рассуждения останутся справедливыми и в том случае, когда начальная скорость скольжения не равна нулю ($v_{s_0} \neq 0$). Вследствие этого процесс

боксования можно всегда разбить на ряд элементов с небольшими изменениями скорости, что удовлетворяет требованию, сформулированному вначале (положение б). Кроме того, в этом случае при наличии нескольких гармонических составляющих нагрузки ската проскальзывание, вызываемое каждой из них, можно считать не зависящим от других составляющих.

При этом условии результирующая скорость проскальзывания ската равна сумме мгновенных значений элементарных скоростей проскальзывания, что приводит к следующему дифференциальному уравнению:

$$\frac{dv_s}{dt} = \sum_{q=1}^{v=q} A_q (\cos \theta_0 - \cos \theta)_q + (v_s - v_{s_0}) \left(B - \rho \sum_{q=1}^{v=q} A_q \cos \theta_q \right). \quad (9)$$

При выводе уравнения (9) были отброшены члены, пропорциональные $\left(\frac{v_s - v_{s_0}}{v}\right)^2$, как малые.

В этом случае уравнение (9) имеет следующее приближенное решение:

$$v_s = \sum_{q=1}^{v=q} C_q \cos \vartheta_q [\cos(\theta + \vartheta)_q - \cos(\theta_0 + \vartheta)_q + \text{tg } \vartheta_q \sin(\theta_0 + \vartheta)_q \cdot (e^{B(l-l_0)} - 1)] + v_{s_0} e^{B(l-l_0)}, \quad (10)$$

где

$$C_q = \frac{P_q}{P_{\text{ном}} [\rho - X(1 - k_{\varphi_0})]}; \quad (11)$$

$$B = \frac{g\varphi_0}{\gamma v} [\rho - X(1 - k_{\varphi_0})]; \quad (12)$$

$$\vartheta_q = \frac{\arctg \frac{2\pi v}{BL_q}}{1 - \sum_{q=1}^{v=q} \rho C_q \cos \arctg \frac{2\pi v}{BL_q}}; \quad (13)$$

v — скорость поезда м/сек.

Уравнение (11) имеет смысл лишь при $v > 0$, так как иначе периодическое изменение нагрузки скатов отсутствует ($C_q = 0$), и справедливо лишь в пределах положительных значений скорости скольжения ската ($v_s \geq 0$). Вне этих пределов имеем: $v_s = 0$, т. е. скольжение отсутствует.

При $\rho = X(1 - k_{\varphi_0})$ имеем неопределенность, которая раскрывается следующим образом:

$$v_s = \frac{g\varphi_0}{\gamma v P_{\text{ном}}} \sum_{q=1}^{v=q} P_q \left[\frac{L_q}{2\pi} (\sin \theta_0 - \sin \theta)_q + (l - l_0) \cos \theta_0 \right] + v_{s_0}. \quad (14)$$

При дополнительных условиях, что для каждой из v гармоник имеем: а) $(\theta_0 + \vartheta)_q = \pi$ и б) $v_{s_0} = 0$, равенство (11) примет следующий вид:

$$v_s = \sum_{q=1}^{v=q} C_q \cos \vartheta_q [1 + \cos(\theta + \vartheta)_q]. \quad (15)$$

Что касается равенства (14), то в нем для рассматриваемого случая следует принять: $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$. При этом второй член скобочного выражения формулы (14) пропадает.

Очевидно, что поставленные условия опреде-

ляют перемежающееся боксование максимальной продолжительности, т. е. состояние, при котором скольжение ската не прекращается, но в то же время не переходит в устойчивое состояние. При этом скорость скольжения изменится в столь узких пределах, что уравнение (11) сохраняет свою силу во всем их диапазоне, и надобность в дроблении процесса на элементы отпадает.

Из равенства (15) получаем следующую формулу для средней скорости боксующего ската при перемежающемся режиме максимальной продолжительности

$$v_{s_{cp}} = \sum_{i_{oq}}^{v=q} \frac{1}{L_q} \int_{i_{oq}}^{L_q + i_{oq}} v_{s_q} dl = \sum_{v=q} C_q \cos \vartheta_q. \quad (16)$$

При $\rho = X(1 - k\varphi_0)$ имеем:

$$v_{s_{cp}} = \frac{g\varphi_0}{2\pi\gamma v P_{ном}} \sum_{v=q} p_q L_q. \quad (16a)$$

Характер изменения скорости скольжения ската при перемежающемся боксовании можно проследить на рис. 2, на котором представлена зависимость скобочного выражения формулы (11) в функции от $(\theta + \vartheta)$, причем принято $v=1$ и $v_s=0$. Для получения мгновенного значения скорости скольжения v_s отрезок ординаты, заключенный между косинусоидой и кривой AC_i , следует умножить на коэффициент β . Из формулы (11) вытекает, что

$$\beta = C \cos \vartheta. \quad (17)$$

Таким образом скорость боксования можно снизить выбором параметров электрической цепи тяговых двигателей, обеспечивающих минимальные значения $\cos \vartheta$ и C . Ввиду ограниченности величины ρ снижения коэффициента β может быть получено лишь с помощью *повышения жесткости тяговых характеристик*, т. е. при $[\rho - X(1 - k\varphi_0)] < 0$.

Из рис. 2, кроме того, следует, что в этом случае даже при самых неблагоприятных условиях, скорость скольжения ската ограничена, причем предельная скорость скольжения ската тем ниже, чем больше X .

Воспользовавшись вышеприведенными формулами, найдем выражение для $\eta_{дин}$ при перемежающемся боксовании одного из скатов электровоза, приняв $v_s=0$ и, следовательно, $\varphi_0 = \psi$. Кроме того, полагаем, что влияние расхождения тяговых характеристик на величину T полностью учтено коэффициентом $\eta_{ст}$.

В таком случае допустимо считать, что все скаты, не связанные электрически с боксующим, будут развивать равные и постоянные по величине усилия тяги F_0 . Мгновенные значения тяговых усилий двигателей, включенных последовательно с двигателями боксующего ската, также равны, но изменяются в зависимости от v_s . Пусть условное количество скатов, связанных электрически с боксующим, равно M (число двигателей, последовательно включенных в одну цепь, деленное на число двигателей, вращающих один скат). В таком случае среднее усилие тяги боксующего электровоза за период перемежающегося боксования примет следующий вид:

$$T = NF_0 - MXv_{s_{cp}}.$$

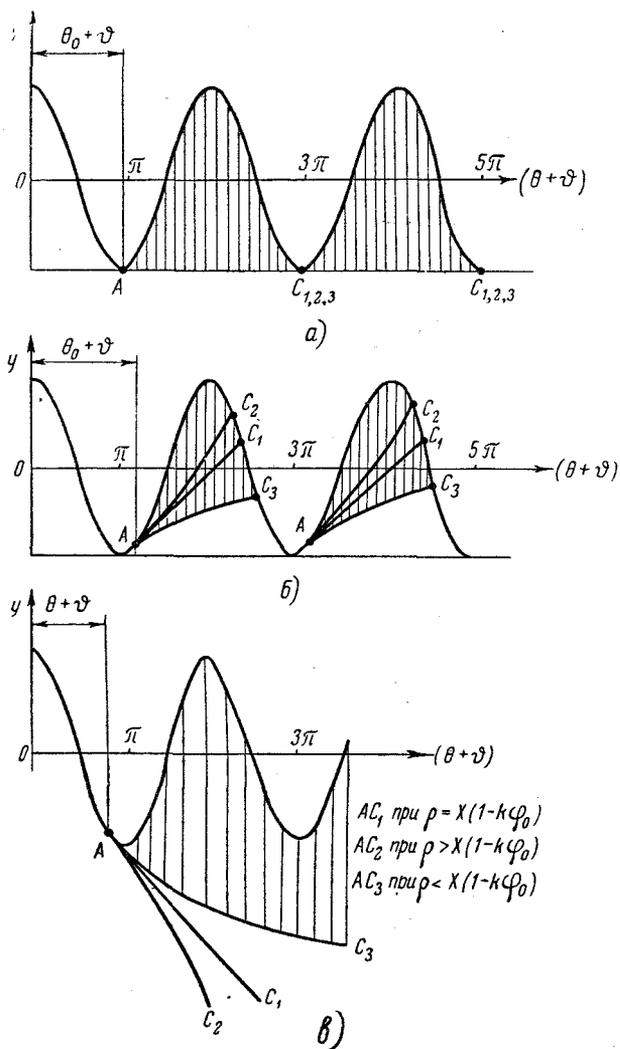


Рис. 2. Исследование уравнения (11): а) перемежающееся боксование максимальной продолжительности $(\vartheta + \theta_0) = P$; б) перемежающееся боксование $2\pi > (\vartheta + \theta_0) > \pi$; в) устойчивое боксование $(\vartheta + \theta_0) < \pi$

Задаваясь различными значениями F_0 , определим из формулы (4) соответствующие им значения θ_{oq} , что дает возможность построить с помощью формулы (11) зависимость: $v_s = X(l)$ и из нее найти $v_{s_{cp}}$. Выбрав значение F_0 , при котором среднее тяговое усилие боксующего электровоза достигает максимума ($T = T_{max}$), найдем режим „предела по сцеплению“.

Очевидно, что динамический коэффициент использования сцепного веса равен:

$$\eta_{дин} = \frac{T_{max}}{\psi \eta_{ст} P_{ном}} = \frac{(NF_0 - MXv_{s_{cp} max})}{\psi \eta_{ст} P_{ном}} \quad (18)$$

При наличии нескольких независимых цепей двигателей для режима перемежающегося боксования максимальной продолжительности, воспользовавшись формулой (16), получим:

$$\eta_{дин} \approx 1 - \sum_{v=q} \left(\frac{p_q \cos \vartheta_q}{\eta_{ст} P_{ном}} + \frac{C_q XM}{N} \right). \quad (20)$$

Очевидно, что каждое из слагаемых второго члена формулы (20) должно удовлетворять условию:

$$\left(\frac{p_q \cos \vartheta_q}{\eta_{ст} P_{ном}} + \frac{C_q XM}{N} \right) \leq \frac{p_q}{\eta_{ст} P_{ном}}. \quad (21)$$

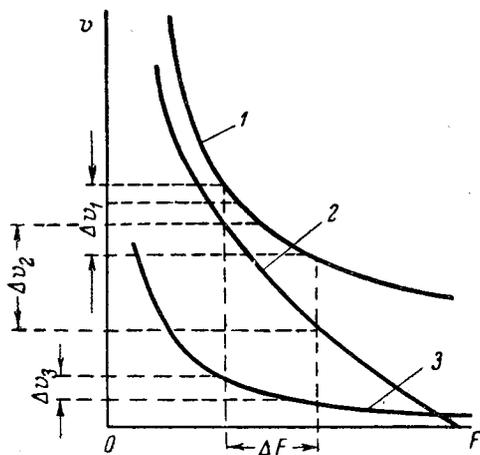


Рис. 3. К формуле (22):

1 — характеристика при номинальном напряжении;
2 — реостатная ступень; 3 — регулировка напряжения $\delta U = U_{\text{ном}}$

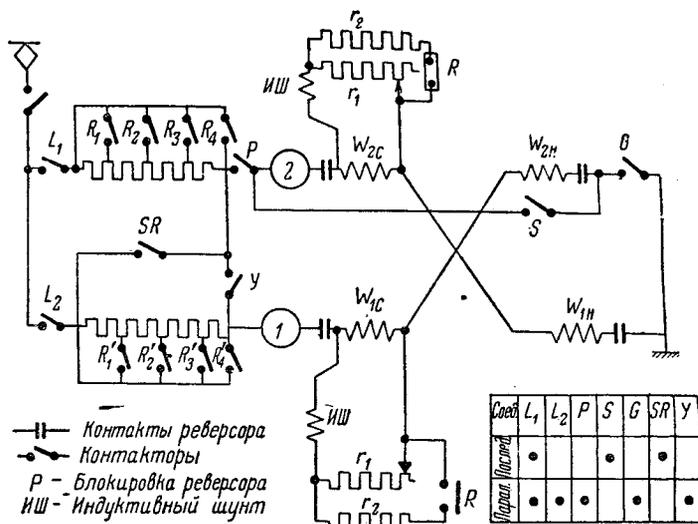


Рис. 4. Принципиальная противобоксовочная схема автора

Знак равенства в формуле (21) соответствует режиму трогания электроваза ($v=0$).

Из формулы (20) ясно, что при возрастании X первый член скобочного выражения убывает, а второй согласно равенству (12) незначительно изменяется, вследствие чего $\eta_{\text{дин}}$ растет. Таким образом в дополнение к рис. 2 отметим, что повышение жесткости тяговых характеристик улучшает тяговые свойства электроваза. Кроме того, из формулы (20) следует, что $\eta_{\text{дин}}$ растет с уменьшением количества двигателей, включенных последовательно, так как при этом падает величина M .

Жесткость тяговых характеристик. Автором был специально исследован вопрос о влиянии на коэффициент жесткости тяговых характеристик (X) параметров электрической схемы электроваза [2]. Здесь проводится лишь конечная формула

$$X = \frac{m \omega_c \cos \varphi X_{\text{ном}} U_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}} (\omega_c - \omega_n) \cos \varphi_{\text{ном}} \mu U}, \quad (22)$$

где n — число двигателей в одной независимой цепи;

m — число последовательно соединенных двигателей на один скат;

U — напряжение, подводимое к цепям тяговых двигателей, $\mu \geq 1$ коэффициент, учитывающий влияние пусковых сопротивлений;

φ — угол сдвига фаз между током и напряжением;

ω_c, ω_n — соответственные числа витков обмоток возбуждения, включенных последовательно со своим якорем и с якорем другой группы. Параметры ω_c и ω_n вводятся лишь при перекрещивании обмоток согласно схеме рис. 4. Как ясно из формулы (22), эта мера позволяет сильно повысить жесткость тяговых характеристик. При этом $X_{\text{ном}}$ определяется непосредственно из тяговой характеристики номинального режима согласно равенству:

$$X_{\text{ном}} = - \frac{dF}{F_0 d v_s}, \quad (23)$$

причем нахождение $X_{\text{ном}}$ может быть выполнено как графически, так и аналитически. Влияние отдельных параметров формулы (22) поясняет рис. 3.

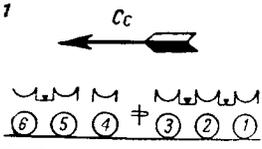
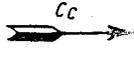
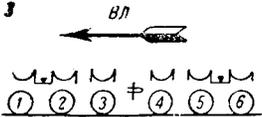
Из формулы (22) вытекает, что жесткость тяговых характеристик повышается: а) при увеличении отношения $\frac{m}{n_{\text{ном}}}$, б) при выводе пускового сопротивления; в) при понижении рабочего напряжения, подводимого к двигателям с помощью ступенчатого трансформатора или преобразовательного агрегата (мотор-генератор, метадин, выпрямитель с сеточным регулированием); г) перекрещиванием обмоток возбуждения по схеме рис. 4. Для устранения чрезмерной чувствительности к колебаниям напряжения в тяговой сети, следует рекомендовать выбирать ω_c значительно большим ω_n ($\omega_c =$ от 3 до 2 ω_n).

При $\omega_n = \omega_c$ получаем $X = \infty$, однако, вследствие своей жесткости система вряд ли работоспособна при резких колебаниях напряжения в контактной сети. Система эта, однако, была применена на опытном французском электровазе: E-704 [5]. При $\omega_n > \omega_c$ имеем систему, непригодную для режима тяги.

Пуск электроваза постоянного тока производится с помощью реостатов. При этом на первых ступенях значение X сильно снижается (рис. 3), возрастая по мере выведения пускового сопротивления. Наоборот, при пуске электроваза однофазного тока от ступенчатого трансформатора жесткость тяговых характеристик падает при переходе на высшие позиции вследствие увеличения U . При полной скорости, вследствие меньшего насыщения магнитной цепи тяговый однофазный двигатель дает значительно меньшее X по сравнению с двигателем постоянного тока. Отсюда следует, что *распространение выводов, полученных на основании испытаний тяговых свойств однофазных электровазов, на электровазы постоянного тока является ошибочным.*

Кривые Müller и Wichert, дающие зависимость η и φ от скорости, приводимые во всех советских учебниках, не применимы к системе постоянного тока, принятой в настоящее время на дорогах СССР.

Физический коэффициент сцепления. Автором сделана попытка найти значения физического коэффициента сцепления, используя изложенную выше теорию для обработки результатов испытаний электровазов ВЛ-19-17 и СС-11-18, на Щербинском кольце НКПС в 1935 г. [4]. Средние значения из

Тип электровоза и направление движения	Число последоват. соединенных двигателей в одной цепи <i>n</i>	<i>v</i> km/h	$\eta_{\text{лин}}$	$\eta_{\text{т}}$	η	$\eta \cdot \psi$ (экспериментальные данные)	ψ	№ лимитирующей оси
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	6	—	—	—	0,807	0,275	0,340	4
	6	10	0,844	} 0,897	0,76	0,250	0,330	4
	3	20	0,901		0,81	0,270	0,332	4
	2	30	0,938		0,84	0,268	0,320	4
	6	0	—	—	0,922	0,302	0,330	1
	6	10	0,898	} 0,924	0,81	0,260	0,320	1
	3	20	0,957		0,885	0,276	0,315	1
	2	30	0,983		0,91	0,293	0,322	1
	6	0	—	—	0,867	0,291	0,336	3
	6	12,5	0,837	} 0,932	0,78	0,251	0,322	3
	3	25	0,899		0,84	0,251	0,300	3
	2	37,5	0,897		0,84	0,272	0,322	3 и 1

многочисленных тщательно проведенных опытов приведены в графе 7 табл. 1.

Как и следовало ожидать, данные эти дают зависимости $\eta\psi=f(v)$, прямо противоположные кривым Müller. Ввиду отсутствия специальной направленности опытов пришлось задать параметрами, характеризующими переменную нагрузку скатов. Эта нагрузка принята состоящей из трех компонентов, вызванных следующими факторами: а) подпрыгиванием электровоза $p_1=0,075 P_{\text{ном}}$; б) галопированием электровоза: $p_2=0,075 \frac{x}{x_{\text{кр}}}$, где x и $x_{\text{кр}}$ соответствующие расстояния от сочленения до рассматриваемой оси подвешивания и до крайних осей электровоза; г) неровностями пути и трением в рессорно-балансирной системе с учетом влияния плоских пят по методологии автора [1]. При трогании принималось $p_1=p_2=0$. Частоты колебаний приняты: для первых двух составляющих (а, б) согласно опытным данным, полученным НИИЖТ при испытании электровоза ВЛ-19-123. Для третьей составляющей частота колебаний равна частоте чередования стыков ($L=12,5$ м). Результаты подсчетов сведены в табл. 1.

Полученные результаты показывают, что в пределах скоростей от 0 до 37,5 km/h физический коэффициент сцепления изменяется незначительно. Следовательно, повышая коэффициент использования сцепного веса, возможно добиться значительного улучшения тяговых свойств как существующих, так и проектируемых электровозов, что подтверждается данными новейших зарубежных образцов. Например швейцарский электровоз $1B_01B_01+1B_01B_01$ при $v=71$ km/h реализует $\eta\psi=0,25$, а электровоз $2C_0+C_02$ для Паулистских ж.д. имеет $\eta\psi=0,225$ при $v=80$ km/h [9, 10].

В СССР и ряде других стран техническая мысль занята вопросом улучшения тяговых свойств электровозов электрическими способами [2, 3, 5, 8],

значительно повышая тем пределы, даваемые кривыми Müller и Wichert.

На рис. 4 приводится принципиальная схема, предлагаемая автором, обеспечивающая повышение коэффициента использования сцепного веса η электровоза. В этой схеме предусмотрены следующие мероприятия: а) перекрещивание обмоток возбуждения тяговых двигателей при $\omega_c > \omega_n$; б) постоянная шунтировка главных обмоток возбуждения регулируемым сопротивлением (r_1) для компенсации отклонений тяговых характеристик; в) в некоторых случаях—шунтировка сопротивлением (r_2) тех же обмоток, но для двигателей задних осей. Кроме того, следует рекомендовать вести борьбу с паразитными движениями электровоза с помощью компенсаторов и тщательного надзора за состоянием электровоза. Меры, указанные в пунктах б и в, были предложены автором еще в 1934 г. [3].

В заключение автор считает своевременным поставить вопрос о производстве специально направленных испытаний для изучения использования сцепного веса электровозов и получения физического коэффициента сцепления.

Литература

1. Д. К. Минов. Отчет о работе. Расчет нагрузок осей тележечных электровозов с плоскими пятнами. МЭИ, 1938.
2. Д. К. Минов. Отчет о работе. Исследование процесса боксования ската в связи с процессами в электрической цепи тяговых двигателей. МЭИ, 1940.
3. Д. К. Минов. Подрешивание и коэффициент использования сцепного веса электровозов типа С, Сс, Си „Электрическая тяга“ № 3, 1934.
4. Д. К. Минов. Основные выводы из сравнительных испытаний электровозов ВЛ и Сс на Щербинском кольце. Бюллетень завода „Динамо“ им. Кирова, февраль 1936.
5. M. Pelou; Electricité № 9, 1936.
6. Mechanical engineers № 9, 1934.
7. Blondet. Revue de l'Electricité et de Mechanique № 12, 1938.
8. Патент DRP 618909. El. Bahnen, № 12, 1939.
9. El. Traction № 7, 1939
10. GER № 1, 1940.

К вопросу о реактировании двух фаз фидеров

Канд. техн. наук, доц. Г. С. БОРЧАНИНОВ и канд. техн. наук, доц. С. А. УЛЬЯНОВ

Московский энергетический Орден Ленина институт и.м. Молотова

В практике строительства электрических установок нередко встречаются затруднения в своевременном введении в эксплуатацию всех элементов установки, вследствие дефицитности реакторов. На тэц Уральского вагоностроительного завода ввиду задержки в поставке оборудования временно установили реакторы только в двух фазах отходящих фидеров, что позволило ввести в эксплуатацию большее число фидеров¹.

Представляет практический интерес произвести всестороннюю проверку эффективности такого способа реактирования фидеров и сопоставить его с обычно применяющимся реактированием всех трех фаз.

При реактировании двух фаз фидеров предполагается, что путем соответствующего чередования нереактированной фазы у фидеров нагрузка генераторов может быть выравнена².

Соотношение между сопротивлениями реакторов при включении их в три и две фазы по условиям к. з. Электрическую систему, состоящую из симметричных элементов, можно охарактеризовать относительно любой ее точки величинами эквивалентных сопротивлений по отношению к системам токов различных фазовых последовательностей, т. е. Z_1 , Z_2 и Z_0 , и эквивалентной э. д. с., равной напряжению U , которое существует в данной точке при нормальном режиме. В соответствии с методом спрямленных характеристик сопротивление Z_1 можно получить для любого момента времени процесса к. з. Имея в виду, что сети генераторного напряжения, для которых рассматривается применение реакторов, работают

с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через большие сопротивления, в дальнейшем можно ограничиться рассмотрением только межфазовых к. з.

Для трехполюсного к. з. в точке, связанной с симметричной системой через произвольные сопротивления в фазах Z_a , Z_b и Z_c , можно, исходя из общей теории симметричных составляющих, получить следующие выражения для симметричных составляющих токов:

$$i_{a_1}^{(3)} = \frac{(Z_a + Z_b + Z_c + 3Z_2) \cdot \dot{U}_a}{(Z_a Z_b + Z_a Z_c + Z_b Z_c) + (Z_a + Z_b + Z_c)(Z_1 + Z_2) + 3Z_1 Z_2} \quad (1)$$

и

$$i_{a_2}^{(3)} = \frac{-(Z_a + aZ_b + a^2 Z_c) \cdot \dot{U}_a}{(Z_a Z_b + Z_a Z_c + Z_b Z_c) + (Z_a + Z_b + Z_c)(Z_1 + Z_2) + 3Z_1 Z_2} \quad (2)$$

Из этих общих выражений получены расчетные выражения для токов при различных частных случаях к. з., которые сведены в табл. 1.

Соотношение между сопротивлениями реакторов, включаемых в две или три фазы, по условию их одинаковой эффективности ограничения токов к. з. при одном и том же виде к. з. можно получить из сравнения соответствующих выражений для полных токов табл. 1. Из сопоставления выражений для токов при трехполюсном к. з. следует, что соотношение между $Z_{Rc(2)}$ и $Z_{Rc(3)}$, зависит от величин Z_1 и Z_2 питающей системы. Z_1 различно для отдельных моментов времени процесса к. з. и поэтому очевидно, что соотношение между $Z_{Rc(2)}$ и $Z_{Rc(3)}$ будет зависеть от того, для какого момента времени к. з. величины токов должны быть одинаковыми при сравниваемых способах реактирования поврежденного фидера. Имея в виду, что к. з. за фидерным реактором обычно имеет большую удаленность относительно источников питания, можно пренебречь затуханием периодической слагающей тока

Таблица 1

Вид	Реакторы в фазах	Значения расчетных сопротивлен.	i_{a_1}	i_{a_2}	i_a
Трехполюсное	a, b и c	$Z_a = Z_b = Z_c = Z_{Rc(3)}$	$\frac{\dot{U}_a}{Z_1 + Z_{Rc(3)}}$	0	$\frac{\dot{U}_a}{Z_1 + Z_{Rc(3)}}$
	b и c	$Z_a = 0;$ $Z_b = Z_c = Z_{Rc(2)}$	$\frac{(2Z_{Rc(2)} + 3Z_2) \dot{U}_a}{Z_{Rc(2)}^2 + 2Z_{Rc(2)}(Z_1 + Z_2) + 3Z_1 Z_2}$	$\frac{Z_{Rc(2)}}{2Z_{Rc(2)} + 3Z_2} j_a$	$\frac{3(Z_{Rc(2)} + Z_2) \cdot \dot{U}_a}{Z_{Rc(2)}^2 + 2Z_{Rc(2)}(Z_1 + Z_2) + 3Z_1 Z_2}$
Двухполюсное между фазами a и b	a, b и c	$Z_a = Z_b = Z_{Rc(3)};$ $Z_c = \infty$	$\frac{\dot{U}_a}{Z_1 + Z_2 + Z_{Rc(3)}}$	$-a^2 j_{a_1}$	$\sqrt{3} \frac{\dot{U}_a}{Z_1 + Z_2 + 2Z_{Rc(3)}} e^{j\alpha}$
	b и c	$Z_a = 0;$ $Z_b = Z_{Rc(2)};$ $Z_c = \infty$	$\frac{\dot{U}_a}{Z_1 + Z_2 + Z_{Rc(2)}}$	$-a^2 j_{a_1}$	$\sqrt{3} \frac{U_a}{Z_1 + Z_2 + Z_{Rc(2)}} e^{j\alpha}$

Примечание. Нижние индексы в скобках указывают число реактированных фаз фидера. Такое обозначение проводится во всем остальном тексте.

к. з. и соответственно считать $Z_1 = \text{const}$. Кроме того, для таких точек к. з. с достаточной точностью можно принять $Z_1 = Z_2 = Z_{\text{sys}}$. Исходя из этих допущений, сопоставляемые выражения для токов при трехполюсном к. з., после некоторых упрощений и пренебрегая активными составляющими сопротивлений всех элементов (что обычно принимается в большинстве практических вычислений токов к. з.), можно представить в виде:

$$j_{a(2)}^{(3)} = \frac{3\dot{U}_a}{j(3x_{\text{sys}} + x_{Rc(2)})} = j_{a(3)}^{(3)} = \frac{\dot{U}_a}{j(x_{\text{sys}} + x_{Rc(3)})}, \quad (3)$$

откуда непосредственно вытекает искомое соотношение

$$x_{Rc(2)} = 3 \cdot x_{Rc(3)}. \quad (4)$$

Нетрудно установить, что при $Z_1 > Z_2$ для удовлетворения условия одинаковой эффективности ограничения тока трехполюсного к. з. должно быть $\frac{x_{Rc(2)}}{x_{Rc(3)}} > 3$. В пределе при $Z_2 = 0$ имеем

$\frac{x_{Rc(2)}}{x_{Rc(3)}} = 3,67$. Приближенное соотношение по выражению (4), как достаточно характерное, используется в дальнейшем анализе.

Из сопоставления расчетных выражений для токов при двухполюсном к. з. табл. 1 следует, что одинаковая степень ограничения тока к. з. достигается, если $x_{Rc(2)} = 2 \cdot x_{Rc(3)}$, т. е. увеличение сопротивления реактора в 1,5 раза меньше, чем по условию эквивалентности токов трехполюсного к. з. при сравниваемых способах реактирования.

На рис. 1 показана кривая относительного увеличения тока трехполюсного к. з. при шунтировании одной фазы фидерного реактора. Кривая построена в функции от отношения $\frac{x_{Rc}}{x_{\text{sys}}}$. При практически наименьшем отношении $\frac{x_{Rc}}{x_{\text{sys}}} = 1,5$, что соответствует остаточному напряжению на шинах около 60%, увеличение тока в фазе, реактор которой будет зашунтирован, составляет около 65%.

Полученное соотношение (4) между сопротивлениями реакторов следует проверить по величинам остаточных напряжений, которые могут быть получены на шинах при применении каждого из сравниваемых способов реактирования фидеров.

В табл. 2 сведены выражения для остаточных

напряжений прямой и обратной последовательностей, а также для коэффициента несимметрии напряжений $\lambda_2 = \frac{U_2}{U_1}$ при трехполюсном и двухполюсном к. з. Эти выражения легко можно получить из 2-го закона Кирхгофа, применяя его к каждой последовательности отдельно в пределах симметричной части рассматриваемой элементарной схемы. Выражения табл. 2 получены

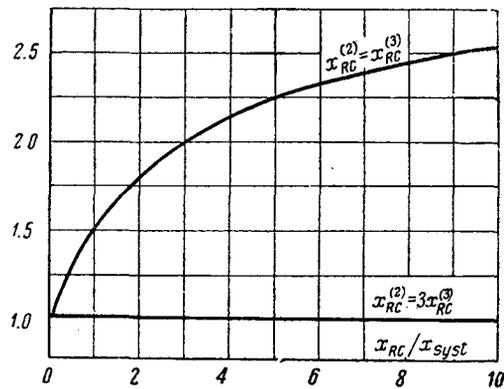


Рис. 1

при принятом ранее допущении, что $x_1 = x_2 = x_{\text{sys}}$ и $R = 0$. Вновь принятым обозначениям соответствуют $\alpha_{(3)} = \frac{x_{Rc(3)}}{x_{\text{sys}}}$ и $\alpha_{(2)} = \frac{x_{Rc(2)}}{x_{\text{sys}}}$.

На рис. 2 показаны кривые изменения U_1 , U_2 и $\frac{U_1(2)}{U_1(3)}$ и λ_2 при трехполюсном к. з. за фидерным реактором в функции от $\alpha_{(3)}$ для случая реактирования трех фаз и $\alpha_{(2)}$ для случая реактирования двух фаз. В соответствии с соотношением (4) при построении кривых принято $\alpha_{(2)} = 3 \cdot \alpha_{(3)}$. Из сравнения кривых рис. 2 следует, что при $x_{Rc(2)} = 3 \cdot x_{Rc(3)}$ остаточные напряжения U_1 при реактировании двух фаз выше, чем при реактировании трех фаз. Правда, это увеличение напряжения U_1 не может в полной мере проявить свое благоприятное влияние на устойчивость работы двигателей, так как в этом случае создается также напряжение U_2 , наличие которого эквивалентно дополнительному снижению напряжения U_1 . Однако из характера кривой λ_2 (рис. 2) следует, что несимметрия остаточных напряжений относительно мала и, следовательно, влияние напряжения U_2 на работу двигателей скажется незначительно.

Таблица 2

Вид к. з.	Реакторы в фазах	\dot{U}_{a_1}	\dot{U}_{a_2}	$\lambda_2 = \frac{U_2}{U_1}$
Трехполюсное	a, b и c	$\frac{\alpha_{(3)}}{1 + \alpha_{(3)}} \dot{U}_a$	0	0
	b и c	$\frac{(2 + \alpha_{(2)}) \alpha_{(2)}}{(1 + \alpha_{(2)}) (3 + \alpha_{(2)})} \dot{U}_a$	$\frac{-\alpha_{(2)}}{(1 + \alpha_{(2)}) (3 + \alpha_{(2)})} \dot{U}_a$	$\frac{1}{2 + \alpha_{(2)}}$
Двухполюсное между фазами	a, b и c	$\frac{(1 + 2\alpha_{(3)})}{2(1 + \alpha_{(3)})} \dot{U}_a$	$\frac{1}{2(1 + \alpha_{(3)})} \dot{U}_a$	$\frac{1}{1 + 2\alpha_{(3)}}$
	a и b	$\frac{1 + \alpha_{(2)}}{2 + \alpha_{(2)}} \dot{U}_a$	$\frac{\alpha_{(2)}}{2 + \alpha_{(2)}} \dot{U}_a$	$\frac{1}{1 + \alpha_{(2)}}$

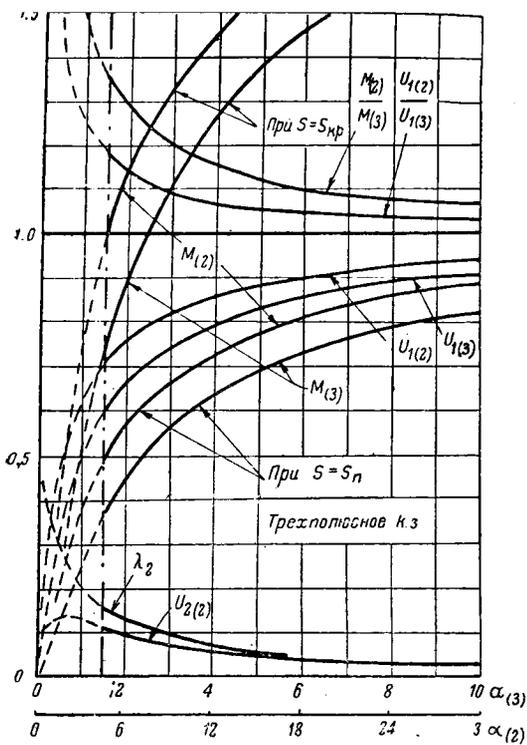


Рис. 2

Пользуясь основными параметрами типового асинхронного двигателя с глубоким пазом (эти двигатели сильнее реагируют на напряжение U_2), можно определить результирующий момент на валу двигателя при разных напряжениях U_1 и U_2 и различных его скольжениях. На рис. 2 показаны кривые изменения результирующих моментов при трехполюсном к. з. на фидере, у которого реактивированы две или три фазы. Верхние из этих

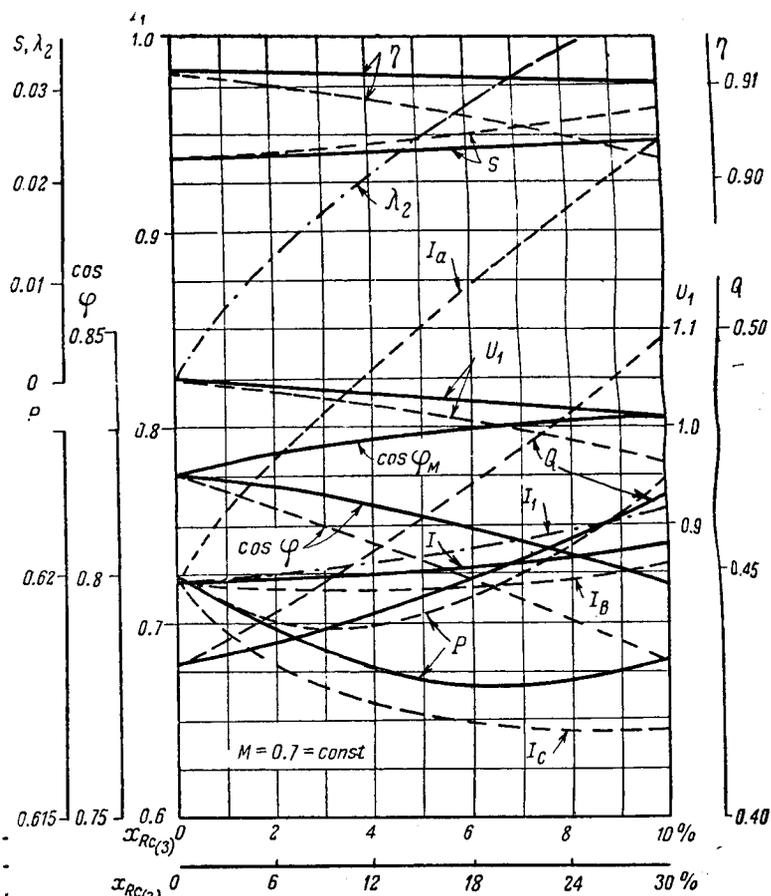


Рис. 4

кривых относятся к критическому скольжению, а нижние — к скольжению при полной номинальной нагрузке двигателя. Кривая отношения моментов $\frac{M(2)}{M(3)}$ остается практически справедливой как

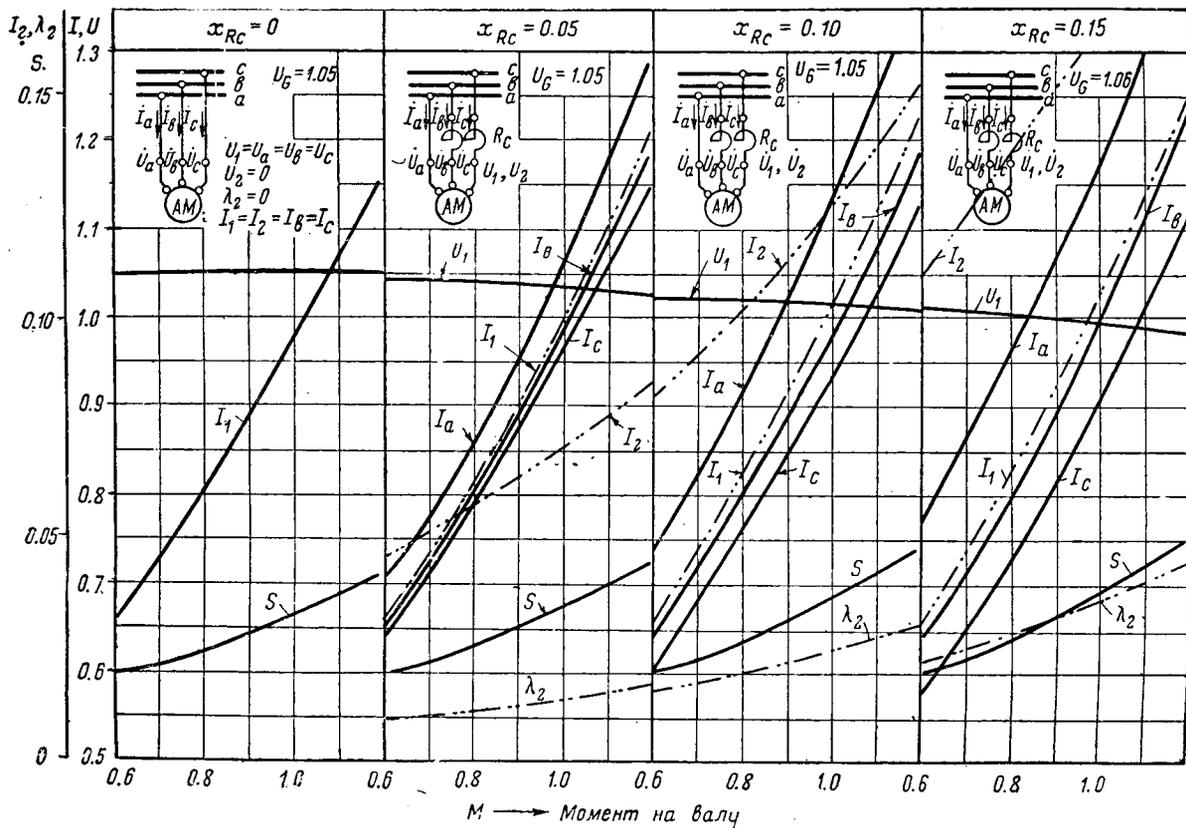


Рис. 3

для нормального скольжения, так и для критического.

Работа асинхронных двигателей при реактировании двух и трех фаз питающего фидера³. При реактировании двух фаз питающего фидера напряжения за реактором при нагрузке будут несимметричными. Степень этой несимметрии зависит от величины сопротивления самих реакторов и загрузки фидера. Для оценки возможности реактирования только двух фаз представляется необходимым выяснить, какой величины могут быть искажения симметрии напряжения при нормальной работе фидера и в какой мере эти искажения количественно изменят характеристики двигателей, питающихся от такого фидера.

Общеизвестно, что асимметрия напряжения создает весьма неблагоприятные условия для работы двигателей. Возникающая при этом несимметричная нагрузка фаз двигателя обуславливает неодинаковый их нагрев и увеличивает потери активной мощности в обмотках ротора, что приводит к уменьшению к. п. д. двигателя. При сохранении допустимых температур нагрева обмоток двигателя и несимметричном напряжении нельзя использовать полной его номинальной мощности.

Правилами и нормами IX ВЭС допускалась асимметрия напряжения $\lambda_2 = \frac{U_2}{U_1} \approx 0,05$. Исследования,

проведенные различными авторами⁴, показали, что такая асимметрия напряжения создает очень тяжелые условия для работы двигателей. В особенности это относится к современным асинхронным двигателям (с глубоким пазом или двойной клеткой), широко использованным и работающим почти на пределе допустимых превышений температур. В последнем стандарте на электрические машины (ОСТ 20020) указания о допусках несимметрии напряжения вообще не приводятся. Очевидно, предполагается, что данный вопрос должен разрешаться индивидуально в каждом конкретном случае.

При реактировании двух фаз фидера наибольшая асимметрия напряжения имеет место непосредственно за реактором. Поэтому высоковольтные двигатели, присоединенные через реакторы к питающим шинам, находятся в более тяжелых условиях, чем двигатели, присоединенные в удаленных точках сети. Следует заметить, что так как асимметрия напряжения при реактировании двух фаз обуславливается различием сопротивлений фаз самой питающей цепи (при этом ее головного участка), то уравнивающий эффект трехфазных двигателей не проявляется так, как это имеет место при возникновении асимметрии напряжения вследствие приключения к сети отдельных несимметричных нагрузок⁵.

Если рассмотреть работу асинхронного двига-

теля типа АМ (как одного из распространенных), в две фазы питающей цепи которого вводятся реакторы, то его рабочий режим в зависимости от загрузки (или развиваемого момента) характеризуется кривыми, представленными на рис. 3 для различных величин сопротивлений вводимых реакторов. Из этих кривых следует, что асимметрия токов резко возрастает с увеличением сопротивления реакторов, в то время как несимметрия напряжения у двигателя очень невелика. Так, при $x_{Rc} = 0,15$ и полной нагрузке двигателя асимметрия напряжения менее 0,04.

Длительная мощность двигателя при асимметрии напряжения ограничивается допустимой температурой его обмоток.

Точное аналитическое определение этой температуры с учетом всех факторов весьма затруднительно. Учитывая, что двигатели современных конструкций для условий нормальной работы рассчитаны почти по пределу максимальной длительно допустимой температуры применяемых видов изоляции и что при несимметричной нагрузке возможны местные нагревы вследствие плохой теплопроводности изолирующих материалов, можно ориентировочно принять, что длительная мощность двигателя при асимметрии напряжения должна быть ограничена условием, чтобы ток в наиболее загруженной фазе не превышал более чем на 5% номинальный ток. При таком критерии длительной мощности двигателя по кривым рис. 3 определены наибольшие рабочие моменты и другие величины, характеризующие условия работы двигателя при включении в две фазы питающей цепи реакторов различного сопротивления. Числовые значения этих величин приведены в табл. 3. В последней колонке табл. 3 дано отношение наибольшего рабочего момента двигателя при данной асимметрии напряжения к его моменту при номинальном токе и симметричном реактировании всех фаз фидера, причем в последнем случае сопротивление реактора в три раза меньше, чем при реактировании двух фаз. Так как различие в скольжениях очень мало, то моменты можно считать пропорциональными полезным мощностям на валу двигателя.

Из данных табл. 3 следует, что с увеличением сопротивления реактора возможность использования мощности двигателя значительно снижается. Так, при $x_{Rc(2)} = 0,15$ (что по ограничению тока к. з. эквивалентно реактированию трех фаз с $x_{Rc(3)} = 0,05$) мощность двигателя может быть использована только на 88%.

Для ориентировочной количественной оценки и сравнения характеристик двигателя при его нормальной работе под нагрузкой в условиях, когда у питающего фидера реактированы три или две фазы, могут служить кривые рис. 4, которые построены по средним параметрам двигателя типа АМ, считая нагрузку $M = 0,7$. Момент сопро-

Таблица 3

$x_{Rc(2)}$	$M_{(2)}$	S	U_1	λ_2	$\frac{M_{(2)}}{M_{(3)}}$
0,05	0,990	0,035	1,035	0,014	0,975
0,10	0,925	0,034	1,020	0,023	0,920
0,15	0,880	0,032	1,000	0,032	0,880

³ В исследовании настоящего вопроса принимали участие доц. Н. А. Мельников и инж. Н. И. Соколов. Выполненные исследования проведено при консультации проф. Б. П. Апарова.

⁴ См. статьи: П. С. Сергеева. Работа трехфазных асинхронных двигателей при несимметричных напряжениях, „Электротехника“, изд. МЭИ, XII — 1, 1934—35, и М. Д. Каминского и С. П. Лебедева. Характеристики асинхронных двигателей при асимметрии напряжений, „Электричество“ № 15—16, 1936.

⁵ См., например, книгу Даль „Электрические цепи“, § 30, 1933.

тивления на валу двигателя принимался постоянным, как это имеет место для большинства механизмов промышленных предприятий. Соотношение между шкалами сопротивлений реакторов, включаемых в две или три фазы, принято из условия одинакового ограничения тока трехполюсного к. з. Кривые рис. 4 наглядно показывают, как ухудшаются условия работы двигателя при реактировании двух фаз.

Соотношения между характеристиками и габаритами реакторов. Зависимость между затратами меди в реакторах и габаритами реакторов при реактировании трех и двух фаз фидера можно приближенно найти, исходя из формулы Хака, т. е.

$$L = n^2 D f \left(\frac{h}{D}, \frac{b}{D} \right) 10^{-6} \text{ [H]}, \quad (5)$$

где

n — число последовательно соединенных витков обмотки реактора,

D — средний диаметр обмотки реактора,

$f \left(\frac{h}{D}, \frac{b}{D} \right)$ — функция формы катушки.

Если положить, что при сравниваемых способах реактирования $\frac{h}{D} = \text{const}$ и $\frac{b}{D} = \text{const}$, т. е.

$f \left(\frac{h}{D}, \frac{b}{D} \right) = \text{const}$ и, кроме того, принять сечение обмотки $q = \text{const}$, то из выражения (5) при $x_{Rc(2)} = 3 \cdot x_{Rc(3)}$ могут быть получены следующие соотношения:

а) отношение весов меди, затраченной в реакторах, ⁶ для одной фазы $\frac{G_{(2)}}{G_{(3)}} = \sqrt[5]{3^3} = 1,935$ и для всего фидера $\frac{G_{(2)}}{G_{(3)}} = \frac{2}{3} 1,935 = 1,29$;

б) соотношение между габаритами реакторов

$$\frac{D_{(2)}}{D_{(3)}} = \frac{h_{(2)}}{h_{(3)}} = \sqrt[5]{3} = 1,245;$$

отношение высот группы реакторов, пренебрегая высотой изоляторов,

$$\frac{H_{(2)}}{H_{(3)}} = \frac{2}{3} 1,245 = 0,83.$$

Экономическая оценка дополнительных потерь. Для ориентировочной экономической оценки сравниваемых способов реактирования произведен примерный подсчет дополнительных потерь мощности для типового фидера. Суммарная присоединенная мощность двигателей потребителей была принята равной 5 MVA. Соответственно этой нагрузке фидерный реактор был принят на ток 500 А с реактивностью 5% при включении в каждую фазу и с реактивностью 15% при включении в две фазы.

Произведенные подсчеты дополнительных потерь мощности, вызываемые реактированием двух фаз, для отдельных элементов данного фидера дают следующие величины: в реакторах — 1,5 kW, в сети и трансформаторах — 1,8 kW, в двигателях — 12,5 kW (считая в среднем уменьшение к. п. д. на 0,25%). Таким образом общее увеличение потерь составляет 15,8 kW.

Оценивая приближенно продолжительность ра-

⁶ Полученное приближенное соотношение достаточно близко согласуется с заводскими данными.

боты данного фидера с такой нагрузкой 3000 час. в год и себестоимость электрической энергии 5 коп/квт-ч, получим стоимость дополнительных потерь энергии в год 2370 руб.

Применительно к рассматриваемому примеру увеличение реактивной мощности фидера составляет 125 kVA. Если считать, что компенсация этой реактивной мощности будет производиться дополнительным увеличением мощности конденсаторных батарей, то потребуются увеличение капитальных затрат в размере 7000 руб.

Реактирование двух фаз фидеров в период временной работы. Развитие вновь сооружаемой установки до полной намеченной проектом мощности обычно осуществляется постепенно. Поэтому в пусковой период и период начальной эксплуатации установки мощность ее меньше, чем при полном развитии, что позволяет в некоторых случаях использовать в виде временного мероприятия реактирование только двух фаз отходящих фидеров. Обязательным условием при этом, разумеется, является то, чтобы ток к. з. при реактировании двух фаз в период временной работы установки не превышал допустимых величин токов выбранных типов аппаратов и других элементов оборудования.

Пользуясь приведенным выражением (3), можно решить обратную задачу — каково должно быть сопротивление системы в период временной работы установки x'_{sys} , чтобы величины токов к. з. при реактировании двух фаз были не больше тех расчетных токов, которые имеют место при полном развитии установки, и реактировании трех фаз фидера теми же реакторами. После преобразования из выражения (3) можно получить следующее соотношение:

$$x'_{\text{sys}} = x_{\text{sys}} + \frac{2}{3} x_{Rc(3)}. \quad (6)$$

Обычно, $x_{Rc(3)} = (1,5 \div 9) \cdot x_{\text{sys}}$ и, следовательно, $x'_{\text{sys}} = (2 \div 7) \cdot x_{\text{sys}}$.

При малых сопротивлениях реакторов (порядка 4 ÷ 6%), включенных в две фазы фидера, асимметрия напряжения у потребителя очень мала и поэтому в очень малой степени ухудшает условия работы двигателей. В среднем можно считать, что снижение к. п. д. двигателей при этих условиях составляет порядка 0,05%. Некоторое увеличение потерь активной мощности в двигателях и распределительной сети частично компенсируется уменьшением потерь в реакторах, так как в одной фазе реактор отсутствует.

Выводы. Произведенное сравнение рассматриваемых способов реактирования фидеров позволяет сделать ряд выводов.

1. Наиболее опасным видом к. з. при реактировании двух фаз фидера является трехполюсное к. з.⁷

2. Для достижения одинакового ограничения тока к. з. сопротивление реакторов при реактировании двух фаз должно быть значительно выше, чем при реактировании трех фаз (приблизительно в 3 раза).

3. При соблюдении соотношения $x_{Rc(2)} = 3 \cdot x_{Rc(3)}$

⁷ Если не рассматривать одновременного замыкания на землю разных фаз в различных точках сети, когда ток к. з. может быть совершенно не ограничен сопротивлением реактора.

остаточные напряжения на шинах выше при к. з. на фидере с двумя реактированными фазами, чем при к. з. на фидере с тремя реактированными фазами.

4. Реактирование двух фаз фидеров создает постоянную несимметрию напряжения у потребителя, что значительно ухудшает условия работы двигателей.

5. Обязательное чередование неактивированной фазы фидеров (для выравнивания нагрузок источников питания) вносит существенные ограничения в коммутацию распределительной сети, так как параллельная работа фидеров с разными неактивированными фазами недопустима (вследствие отсутствия ограничения токов к. з. и возможного возникновения уравнивающих токов).

6. В связи с предыдущим указанием и по другим причинам реактирование двух фаз предъявляет дополнительные требования к выполнению релейной защиты.

При реактировании двух фаз, обеспечивающем такое же ограничение тока к. з., что и при реак-

тировании трех фаз, имеют место: а) большие потери напряжения от питающих шин до точек присоединения нагрузок, а следовательно, и большие отклонения напряжения при изменении рабочих режимов; б) невозможность использования полной мощности двигателей ввиду неодинакового нагрева их фазовых обмоток; в) заметное снижение к. п. д. двигателя; г) увеличение в фидере потерь активной и реактивной мощностей, т. е. снижение общего к. п. д. передачи энергии к потребителю; д) уменьшение коэффициента мощности фидера и вследствие этого удорожание фазокомпенсирующих устройств; е) увеличение расхода меди, необходимой для реакторов; ж) приблизительное сохранение той же кубатуры реакторного этажа распределительного устройства.

Из изложенного следует, что реактирование двух фаз фидеров является нецелесообразным. Оно осуществимо лишь в некоторых случаях как временное мероприятие, при этом сопротивление используемых для этой цепи реакторов должно быть не более $4 \div 6\%$.

Устойчивость и переходные процессы шунтового двигателя постоянного тока

Акад. В. П. НИКИТИН и канд. техн. наук Н. П. КУНИЦКИЙ

Целью настоящей работы является исследование устойчивости работы шунтового двигателя¹ и выявление условий возникновения колебаний при переходных процессах.

При выводе условий устойчивости работы шунтового двигателя его магнитный поток при переходных процессах можно считать постоянным, либо предполагая, что двигатель снабжен компенсационной обмоткой, либо пренебрегая реакцией якоря. Демпфирующее действие токов Фуко уменьшает ошибки, связанные с таким допущением.

Устойчивость работы шунтового двигателя без учета индуктивности якоря. Уравнения для скорости n двигателя

$$\frac{dn}{dt} + \frac{375 Sn}{GD^2} = \frac{375 (k\Phi U - AR)}{GD^2 R}, \quad (1)$$

и для тока i якоря двигателя —

$$\frac{di}{dt} + \frac{375 Si}{GD^2} = \frac{375 (DU + Ac\Phi)}{GD^2 R}, \quad (2)$$

могут быть получены на основании основных уравнений электропривода. В этих уравнениях $S = \frac{dM_c}{dn} - \frac{dM}{dn}$ — коэффициент устойчивости

$D = \frac{dM_c}{dn}$ — тангенс угла наклона к оси абсцисс характеристики $M_c = f(n)$ механизма (рис. 1),

A — момент сопротивления механизма при покое (при $n=0$),

GD^2 — маховой момент привода,
 R — сопротивление цепи якоря двигателя,

k и c — постоянные величины,

M — момент двигателя,

$M_c = A + Dn$ — момент сопротивления механизма,
 U — напряжение на зажимах двигателя, считаемое постоянным.

Интегрируя уравнения (1) и (2), получим для мгновенного приращения скорости $\Delta n = n - n_y$ и тока $\Delta i = i - i_y$ (где $n_y = \frac{k\Phi U - AR}{RS}$ и $i_y = \frac{DU + Ac\Phi}{RS}$ конечные установившиеся значения скорости и тока) следующие выражения:

$$\Delta n = \Delta n_y \cdot e^{-\frac{375St}{GD^2}} = \Delta n_y \cdot e^{-\frac{t}{B_0}}, \quad (3)$$

и

$$\Delta i = \Delta i_y \cdot e^{-\frac{375St}{GD^2}} = \Delta i_y \cdot e^{-\frac{t}{B_0}}, \quad (4)$$

если $\Delta n_y = n_{y1} - n_{y2}$ и $\Delta i_y = i_{y1} - i_{y2}$ — полные приращения скорости и тока при переходе из одного состояния равновесия, характеризуемого величинами n_{y1} и i_{y1} , в другое — n_{y2} и i_{y2} . Из этих уравнений следует, что при условии пренебрежения индуктивностью якоря ток, момент и скорость постепенно, без колебаний и без прохождения через максимум, возрастают асимптотически от начальных значений i_{y1} , M_{y1} и n_{y1} до конечных установившихся значений.

Постоянная $B_0 = \frac{GD^2}{375S}$ является несколько более общим понятием, чем электромеханическая

¹ См. статью акад. В. П. Никитина „О динамическом равновесии систем с непрерывно меняющейся нагрузкой“, „Электричество“ № 1, 1941.

постоянная $B = \frac{GD^2R}{375kc\Phi^2}$, так как она учитывает еще дополнительно угол наклона характеристики механизма. При $M_c = \text{const}$, т. е. $D=0$, $B_0=B$.

Время разгона до скорости $n_1 < n_{y_1}$, равное

$$t_p = \frac{GD^2}{375 \cdot S} \ln \frac{n_{y_2} - n_{y_1}}{n_{y_2} - n_1}, \quad (5)$$

будет тем меньше, чем больше S , т. е. чем больше Φ и D и меньше R .

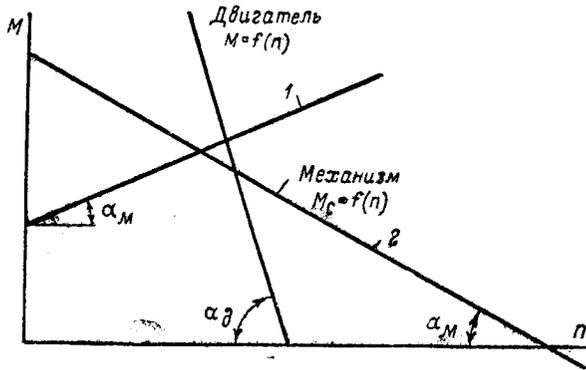


Рис. 1

Полагая в (5) $n_{y_1} = 0$, получим время пуска, переходящего на единицу махового момента:

$$\frac{t_p}{GD^2} = \frac{1}{375S} \ln \frac{1}{1-\beta},$$

где $\beta = \frac{n_1}{n_{y_2}}$. Время пуска до установившейся скорости $n_1 = n_{y_2}$ будет $t_p = \infty$.

При динамическом торможении $M < 0$ и $S = \frac{dM_c}{dn} + \frac{dM}{dn} = D + \frac{kc\Phi^2}{R}$; уравнения для этого случая могут быть получены из уравнений (1) и (2), полагая здесь $U=0$. Время торможения от скорости n_{y_1} до остановки, равное

$$t_{\text{тор}} = \frac{GD^2}{375 \cdot S} \ln \frac{n_{y_1} + \frac{A}{S}}{\frac{A}{S}},$$

всегда конечно.

Уравнения для торможения противовключением получим из (1) и (2), полагая $U = -U$. Время торможения со скорости $-n_{y_1}$ до остановки

$$t_{\text{тор}} = \frac{GD^2}{375 \cdot S} \ln \left(1 - \frac{n_{y_1}}{n_{y_2}} \right)$$

всегда конечно.

При отрицательном (движущем) статическом моменте, например при тормозном спуске грузов в подъемных механизмах, движении электропоезда под уклон, $M < 0$ и $M_c < 0$, поэтому

$$S = \frac{dM}{dn} - \frac{dM_c}{dn} = \frac{kc\Phi^2}{R} - D.$$

Для динамического торможения уравнения могут быть получены из (1) и (2), полагая в них $U=0$ и $A=-A$.

Условием устойчивой работы двигателя, при которой в случае нарушения равновесия мгновенные отклонения величин скорости, тока и момента от конечных установившихся значений стремятся с течением времени убывать к нулю,

будет, согласно (3) и (4), при пренебрежении индуктивностью якоря $S > 0$ (как при положительном, так и отрицательном статическом моменте).

Устойчивость работы шунтового двигателя с учетом индуктивности якоря. Обозначая через L — индуктивность и $T = \frac{R}{L}$ — постоянную времени цепи якоря, получим, на основании уравнений электропривода,

$$\frac{d^2n}{dt^2} + \left(\frac{1}{T} + \frac{D375}{GD^2} \right) \frac{dn}{dt} + \frac{375 \cdot Sn}{TGD^2} = \frac{375(k\Phi U - AR)}{LGD^2}; \quad (6)$$

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \left(\frac{1}{T} + \frac{D375}{GD^2} \right) \frac{di}{dt} + \frac{375Si}{TGD^2} = \frac{375(DU + Ac\Phi)}{LGD^2}. \quad (7)$$

Эти основные уравнения определяют динамическую характеристику двигателя, представляющую собой зависимость числа оборотов n двигателя от его момента при переходных процессах. Будем считать L постоянным.

Интегрируя, получим:

$$\left. \begin{aligned} n &= C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t} + n_{y_2}, \\ i &= C_3 e^{\alpha_1 t} + C_4 e^{\alpha_2 t} + i_{y_2}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где

$$\alpha_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T} + \frac{D375}{GD^2} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{T} + \frac{D375}{GD^2} \right)^2}. \quad (9)$$

Установившиеся значения n_{y_2} и i_{y_2} определяются точкой пересечения характеристик двигателя и механизма и для них легко вывести выражения:

$$\begin{aligned} n_{y_2} &= \frac{(S-D)n_0 - A}{S} = \frac{k\Phi U + AR}{RS}, \\ i_{y_2} &= \frac{(S-D)(Dn_0 + A)}{k\Phi S} = \frac{DU + Ac\Phi}{RS}, \\ M_{y_2} &= \frac{(S-D)(Dn_0 + A)}{S}. \end{aligned}$$

Корни α_1 и α_2 могут быть действительными или мнимыми.

Для устойчивого состояния работы двигателя действительные корни α_1 и α_2 или вещественные части β комплексных корней должны быть отрицательны, а для этого должны быть соблюдены следующие два условия устойчивости:

$$1) \left(\frac{1}{T} + \frac{375 \cdot D}{GD^2} \right) > 0, \text{ т. е. } \beta < 0; \quad (10)$$

$$2) S = D + \frac{kc\Phi^2}{R} > 0. \quad (11)$$

При повышающейся или горизонтальной характеристике механизма $M_c = f(n)$, т. е. при $D > 0$ или $D=0$ оба условия устойчивости соблюдены и состояние всегда будет устойчивым.

При падающих характеристиках механизма $M_c = f(n)$ ($D < 0$), что имеет место у стана бесслитковой прокатки (стан для нового способа прокатки, который по постановлению XVIII съезда ВКП(б) должен быть освоен в промышленном масштабе в третьей пятилетке), состояние будет устойчивым только, если будут соблюдены следующие условия:

$$1) \frac{1}{T} > \frac{D \cdot 375}{GD^2} \text{ или } D < \frac{GD^2}{375 \cdot T}, \quad (12)$$

$$2) S = \frac{kc\Phi^2}{R} + (-D) > 0, \text{ т. е. } \frac{kc\Phi^2}{R} > D. \quad (13)$$

Будем называть значение величины $D_{кр} = \frac{GD^2}{375 \cdot T}$, при котором состояние переходит из устойчивого в неустойчивое, — критическим значением. Условия (12) и (13) имеют место лишь при достаточно малом D , т. е. при малом угле наклона α_m характеристики механизма (рис. 1). Если же хотя бы одно из условий (12) или (13) не соблюдается, то работа будет неустойчивой.

Из (12) следует, что при заданной постоянной T и заданной значительной величине D (большом α_m) состояние может быть сделано устойчивым за счет увеличения GD^2 . Наоборот, при заданных GD^2 и D состояние может быть сделано устойчивым путем уменьшения T , что можно достичь увеличением R и цепи якоря, однако, при этом должно соблюдаться неравенство (13), для соблюдения которого необходимо уменьшение R . Из (13) вытекает также, что при данных значениях D и R равновесие может сделаться неустойчивым при работе двигателя с ослабленным потоком, т. е. на скоростях, больших номинальной.

Исследуем теперь вопрос о возможности появления колебаний при переходных процессах. Колебания могут возникнуть, α_1 и α_2 будут мнимые только тогда, когда соблюдается второе условие устойчивости, т. е. $S > 0$.

Из (9) следует, что переходной процесс аperiodичен, если

$$s < \left(\frac{1}{T} + \frac{D \cdot 375}{GD^2} \right)^2 \cdot \frac{TGD^3}{1500}. \quad (14)$$

Если же $S > \left(\frac{1}{T} + \frac{D \cdot 375}{GD^2} \right)^2 \frac{TGD^3}{1500}$, то переходной процесс будет колебательным. Обозначим через критический коэффициент устойчивости величину

$$S_{кр} = \left(\frac{1}{T} + \frac{D \cdot 375}{GD^2} \right)^2 \cdot \frac{TGD^3}{1500}, \quad (15)$$

являющуюся границей между аperiodическим и колебательным процессами. Переходной процесс будет аperiodическим при $S < S_{кр}$ и колебательным при $S > S_{кр}$.

При $D=0$ условием отсутствия колебаний является неравенство

$$S = \operatorname{tg} \alpha_d < \frac{GD}{1500 T}$$

или

$$k_c \Phi^2 < \frac{GD^2 R^2}{1500 L}, \quad (16)$$

где α_d — угол наклона к оси абсцисс характеристики двигателя $M = f(n)$ (рис. 1).

Таким образом уменьшение GD^2 , увеличение L и уменьшение R способствуют возникновению колебаний и наоборот. Увеличение угла α_d характеристики двигателя также способствует возникновению колебаний.

Колебания будут затухающие, т. е. работа привода устойчива, если соблюдается первое условие устойчивости. В противном случае колебания становятся возрастающими и состояние — неустойчивым. При $D \geq 0$, и $D = 0$, $\beta < 0$, колебания могут быть только затухающими.

При $D < 0$ и $D < \frac{GD^2}{375 \cdot T}$ (по абсолютной величине) колебания также затухают.

При $D = \frac{GD^2}{375 \cdot T}$, т. е. при $\beta = 0$ колебания не затухают.

Наконец, при $D > \frac{GD^2}{375 \cdot T}$, т. е. при $\beta > 0$ колебания делаются возрастающими.

Таким образом увеличение GD^2 , уменьшение по абсолютной величине отрицательного D (более

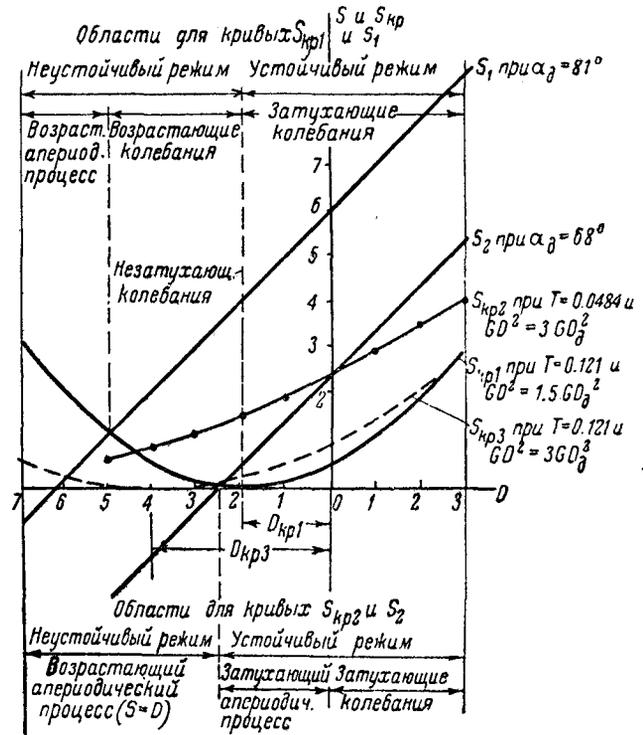


Рис. 2

пологая характеристика механизма), увеличение R и уменьшение L способствуют при $D < 0$ возникновению затухающих колебаний. Это необходимо иметь в виду при проектировании электропривода станов бесслитковой прокатки.

На рис. 2 представлена диаграмма (кривые S и $S_{кр}$), характеризующая влияние величины D на устойчивость работы привода и характер переходного процесса для двигателя ПН-1750, 118 kW 220 V, 760 об/мин, ($GD^2_d = 60 \text{ kgm}^2$). Кривая S_1 построена для $\alpha_d = 81^\circ$, кривая $S_{кр1}$ для $T = 0,121 \text{ сек}$ и $GD^2 = 1,5 (GD^2)_d$. Для этого случая $D_{кр1} = -1,98$, т. е. $\alpha_{кр} = 63^\circ$. Таким образом при углах α_m падающей характеристики механизма, больших 63° , работа привода неустойчива. При $D > -5$, $S > S_{кр}$ и процесс будет колебательным; при $D < -5$ — процесс аperiodический (возрастающий), причем для $D > -1,98$ колебания — затухающие, $D = -1,98$ — незатухающие, для $D = -1,98 \div (-5)$ — возрастающие. Кривая S_2 дана для $\alpha_d = 68^\circ$, а $S_{кр2}$ — для $T = 0,0484 \text{ сек}$ и $GD^2 = 3 (GD^2)_d$. В этом случае устойчивой работой является лишь область $D = -2,5 \div -3$, так как при $D < -2,5$, $S < 0$, хотя и $D_{кр2} = -9,9$ лежит значительно ниже. Для $D > 0$ — процесс затухающий колебательный, для $D < 0$ — аperiodический, причем при $D = -2,5$ процесс из затухающего переходит в возрастающий.

Сопоставляя кривую $S_{кр3}$ с кривой S , видим, что для $\alpha_1 = 81^\circ$, $T = 0,121 \text{ сек}$ и $GD^2 = 3 (GD^2)_d$ — колебания будут незатухающие при $D_{кр3} = -3,96$, затухающие при $D > -3,96$, возрастающие при $D = -3,96 \div (-6)$; при $D < -6$ процесс делается апе-

риодическим возрастающим. Из рис. 2 следует также, что увеличение сопротивления R перемещает границу перехода колебательного процесса в апериодический в сторону уменьшения D .

Если характеристика двигателя $M=f(n)$ делается более пологой (более мягкой), то процесс будет апериодическим при меньших маховых моментах и более высоких значениях D . Пользуясь

приведенными выше критериями, можно определить, будет ли работа системы устойчива, а также выявить характер переходного процесса. Вопрос устойчивости играет большую роль для механизмов с падающей характеристикой, в частности для станов беслитковой прокатки.

(Окончание в следующем номере)

Изучение электрических систем на моделях с вращающимися машинами¹

Инж. В. А. ВЕНИКОВ

Энергетический институт Академии Наук СССР

Придерживаясь в дальнейшем терминологии, принятой в литературе по моделированию [1, 2], подобными электрическими системами будем считать электрические системы, в которых все процессы протекают так, что отношения сходственных величин в сходственные моменты времени есть постоянные числа. Эти числа, называемые коэффициентами преобразования, определяют относительный масштаб явлений одной системы (модели) по отношению к другой (оригиналу). Временное соответствие процессов может быть двояким: 1) сходственные явления в системах могут наступать одновременно (синхронность — коэффициент преобразования времени в этом случае равен единице); 2) сходственные явления могут наступать разновременно, но так, что интервалы времени между явлениями одной системы — модели — находятся в постоянном соотношении с интервалами времени, отделяющими сходственные явления в другой системе-оригинале (так называемая „гомехронность“ [2]).

Во всех случаях моделирования в первую очередь необходимо найти условия подобия стационарных и переходных режимов синхронных генераторов — основных элементов современной электрической системы.

Очевидно, что условия подобия должны определяться на основе системы дифференциальных уравнений, в общей форме описывающих явления данного класса². Анализ этих уравнений методами теории моделирования позволяет найти условия подобия (критерии подобия) и соответствующие коэффициенты преобразования.

Однако в интересующих нас вопросах моделирования электромеханических явлений нет необходимости точно следовать этим методам, детально разработанным в применении к теплотехнике, гидро- и аэродинамике. Специфическая форма

записи уравнений электрической системы, выражаемых, как правило, в специальной системе единиц (per unit system [3, 4]), уже содержит модельные соотношения и позволяет проще и нагляднее получить тот же результат непосредственно из основных уравнений.

Для генератора такими уравнениями являются так называемые уравнения Парка [5]. Записанные в общем виде они справедливы для всех синхронных генераторов независимо от их мощности, конструкции, частоты, параметров, описывая с известными допущениями весь класс явлений.

Уравнения эти могут быть записаны так:

$$\frac{M}{M_{\text{мех}}} p^2 \delta - 1 = \frac{1}{M_{\text{мех}}} [i_q \psi_d - i_d \psi_q], \quad (1)$$

$$i_d = \frac{G(p) E_0 - \psi_d}{X_d(p)}; \quad i_q = -\frac{\psi_q}{X_q(p)}; \quad i_0 = -\frac{\psi_0}{X_0}, \quad (2)$$

$$e_d = p \psi_d - \frac{r}{X_d(p)} [G(p) E_0 - \psi_d] - \psi_q P(t + \delta), \quad (3)$$

$$e_q = p \psi_q + \frac{r}{X_q(p)} \psi_q + \psi_d p(t + \delta). \quad (4)$$

При одной обмотке возбуждения и отсутствии демпферных цепей³

$$X_d(p) = \frac{X_d + X_d' p T_0}{1 + p T_0}; \quad G(p) = \frac{1}{1 + p T_0}; \quad X_q(p) = X_q.$$

Здесь используются обозначения, принятые в теории двух реакций, — p — оператор Хевисайда, $M_{\text{мех}}$ — механический момент и т. д. Специальная (per unit system) система единиц, принятая при записи этих уравнений, характерна тем, что она строится применительно к определенной электрической системе или определенному генератору, параметры которого (так называемые „базисные“) служат единицами измерения.

Величины, измеряемые в этой системе, не имеют размерности и в этом смысле ее называют иногда системой относительных единиц. Связь между основными (или независимыми) и производными единицами устанавливается на базе основных законов, которым подчинены данные явления⁴.

³ При наличии демпферных цепей выражения $X_d(p)$, $X_q(p)$, $G(p)$ усложняются, но структура их остается та же — в них входят комбинации из реактансов и постоянных времени, умножаемых на оператор $-p$.

⁴ Связь эта устанавливается так, что по терминологии, иногда применяемой в литературе (напр. 1, 2) эта система может рассматриваться как „абсолютная“.

¹ Краткое сообщение о работе, сделанной автором в лаборатории электросистем Энергетического института Академии Наук СССР. Работа проводилась под общим руководством члена-корр. Академии Наук СССР, д-ра техн. наук И. С. Брук.

² Под классом явлений понимаем все множество явлений, определяемых какой-либо системой дифференциальных уравнений. Задание условий однозначности, в виде конкретных численных значений, выделяет из класса явлений одно конкретное явление. Задание условий однозначности в виде произведения этих численных значений на множители преобразования, выделяет из класса явлений группу подобных явлений [1, 2].

Известно, что число основных единиц будет строго определено, если при рассмотрении какой-либо группы физических явлений принята определенная форма записи основных уравнений [6].

Форма записи уравнения (1) — (4) предполагает, что в качестве основных единиц электрических величин (P, U, I, Z) приняты какие-либо два нормальных параметра исследуемого генератора, например, мощность P и ток I . В качестве единицы электрической и механической угловой скорости вращения принимается синхронная скорость генератора. При этом единицы угла и времени не могут рассматриваться как основные: единицей угла служит электрический радиан, единицей времени — промежуток времени в секундах, в течение которого ротор, вращающийся с синхронной скоростью, поворачивается на угол, равный радиану. (Численное значение единицы $[t] = \frac{1}{\omega_0}$ таким образом оказывается зависящим от частоты генератора).

Всякое уравнение, описывающее физический процесс, не может изменить своей физической сущности при изменении основных единиц измерения⁵. Так, если в рассматриваемом случае в качестве основных единиц принять не номинальные параметры генератора (P_n, I_n), а некоторые доли их номинальных значений, то это отразится только на численных значениях величин, входящих в основные уравнения; физический смысл уравнений от этого не изменится. Отсюда следует, что численные значения параметров генератора, выраженные в специальной системе единиц, зависят, с одной стороны, от выбора основных единиц измерения (будем называть эту зависимость *формальной*) и, с другой стороны, от индивидуальных качеств генератора, т. е. его мощности, конструкции, частоты (назовем эту зависимость *материальной*⁶). Вторая зависимость имеет следующий характер [8, 9]: активное сопротивление статора r обратно пропорционально частоте генератора ($r \propto \frac{1}{f}$) и приблизительно пропорционально $\frac{1}{\sqrt{P_n}}$; величины реактансов X_d, X_q, X_d', X_0 изменяются в сравнительно небольших пределах в полтора-два раза в зависимости от конструкции машины и почти не зависят от мощности и частоты; постоянная инерции M возрастает вместе с мощностью и числом оборотов, изменяясь в довольно широких пределах в зависимости от конструкции; постоянные времени T пропорциональны частоте и $\sqrt{P_n}$. Характеристика холостого хода зависит от конструкции генератора и может быть одинакова для различных генераторов.

Из сказанного очевидно, что если при выражении параметров какого-либо генератора в специальных

⁵ Автор считает это положение очевидным. Вель физические законы в их первоначальных формулировках всегда говорят только об определенных пропорциональностях. Доказательство известной π теоремы также основано на очевидности этого положения [7]. Можно, конечно, рассматривать свойство инвариантности уравнений, записанных в „абсолютной“ системе единиц, как следствие теоремы Фурье [1, стр. 172], но тогда следовало бы уточнить понятие „абсолютных“ систем.

⁶ Применяя понятия „формальное“ и „материальное“ изменение, следуем Г. А. Афанасьевой-Эрифест, см. „Mathematische Appalen“ 1:16, Bd. LXXVII, S. 259 а также [1], стр. 177 и [2], стр. 52.

единицах в качестве основных единиц будут приняты некоторые доли номинальных значений, при выражении же параметров другого будут приняты некоторые другие значения основных единиц, то два генератора различной мощности, конструкции и частоты могут иметь в системе специальных единиц соответственно равные параметры. Если у двух каких-либо генераторов такое равенство параметров имеет место, то соответственно одинаковы будут и уравнения этих генераторов. Следовательно, процессы в сравниваемых генераторах, записанные в специальной системе единиц, будут совершенно тождественны (при рассмотрении в специальном времени будет синхронны; сходственные величины — соответственно равны).

Если процессы, происходящие в генераторах, при рассмотрении в специальной системе единиц получаются тождественными, то обратный переход к практической (V, A, sec) системе единиц может привести только к изменению масштабов записи, не изменив тождественности процессов.

Таким образом *генераторы, уравнения которых в специальной системе единиц тождественны, подобны.*

При этом, если частоты генераторов равны и, следовательно, $[t_{\text{баз.1}}] = [t_{\text{баз.2}}]$, то синхронность процессов будет иметь место как в специальной, так и в практической системе единиц; если частоты генераторов различны, то синхронность будет иметь место в специальной системе, в практической системе — процессы будут гоихронны, причем коэффициент преобразования времени — $n_t = n_f = \frac{f_m}{f_0}$. Итак, характерная особенность уравнений, записанных в специальной системе единиц, заключается в том, что задание условий однозначности, т. е. численных значений параметров X, R, M, T , начальной состояния системы (δ_0, E_0) и некоторых дополнительных условий, которые можно рассматривать как своего рода „граничные условия“⁷, выделяет из класса явлений не одно конкретное явление, а целую группу явлений, подобных друг другу и происходящих в подобных генераторах. Следовательно, результаты опытов или вычислений, записанные в специальной системе единиц, всегда могут быть распространены на целый ряд генераторов, подобных друг другу. Отсюда вытекает *метод моделирования*: необходимо так подобрать параметры модели, чтобы ее основные дифференциальные уравнения, записанные в специальной системе единиц, точно совпали с соответствующими уравнениями оригинала.

Надлежащий подбор параметров модели осуществляется как материальным изменением параметров, так и формальным их изменением, т. е.

⁷ Под дополнительными или граничными условиями понимаем следующее: с явлениями, непосредственно нас интересующими, соприкасаются другие явления, не отраженные в системе основных уравнений, но оказывающие свое влияние на ход процессов. Так, одновременно с процессами в генераторе происходят процессы в турбине, в регуляторах напряжения, в релейной защите, в аппаратах, отключающих к. в. и т. д. Если сами по себе эти процессы нас не интересуют, то и моделированию они не подлежат. Но влияние их на моделируемые процессы должно быть отражено правильно: первичный двигатель модели должен иметь ту же, что и турбина характеристику момента в функции оборотов; у регулятора напряжения модели должна быть такая же характеристика, что и у регулятора оригинала, скорости отключения также должны находиться в соответствии с скоростями отключения у оригинала и т. д.

изменением основных единиц (или, другими словами, надлежащим выбором базисных величин).

В каждом частном случае по конкретным условиям можно установить, как и какие параметры следует изменить.

Техника нахождения условий подобия сводится при этом к следующему: записываем уравнения малой машины, предназначенной для модели, и уравнения оригинала, принимая за базисные их номинальные мощности и напряжения и считая, что частоты их равны. Выражая параметры малой машины M через параметры оригинала O , будем иметь:

$$r_m = n_r r_0; \quad X_m = n X_0; \quad M_m = \frac{1}{n_m} M_0; \quad T_m = \frac{1}{n_T} T_0.$$

Подставляя эти выражения в уравнения (1)–(4), получаем систему основных уравнений модели, отличающуюся от уравнений оригинала постоянными коэффициентами n_r, n_x, n_m, n_T .

Для осуществления модели необходимо добиться, чтобы эти коэффициенты исчезли, сократившись с коэффициентами, появляющимися в уравнениях малой машины благодаря формальному и материальному изменению ее параметров.

Покажем, как это производится в различных случаях моделирования мощного генератора на малой лабораторной установке.

Моделирование изменением частоты модели. При этом способе моделирование постоянных времени и активных сопротивлений, представляющее как известно, наибольшие трудности, легко осуществляется увеличением частоты (скорости вращения) модели. При увеличении ω_m в n раз ($n_\omega = \frac{\omega_m}{\omega_0} = \frac{f_m}{f_0}$) активное сопротивление статора r уменьшается в n_ω раз, а постоянные времена T в n_ω раз возрастают, если при этом $n_r = n_T = n_\omega$, то после увеличения частоты $r_m = r_0$ и $T_m = T_0$.

При этом n_ω не может быть выбрано больше, чем $\sqrt{n_m}$, иначе величина M_m , возрастающая пропорционально квадрату оборотов⁸, будет больше, чем для оригинала. Из этих соображений, с учетом необходимости выдержать надлежащие соотношения между X_{d_0}, X_{q_0} и X_{d_m}, X_{q_m} , определяется частота генератора-модели.

Если значение n_ω будет выбрано слишком большим, то появится необходимость в моделировании ряда побочных явлений (потерь на гистерезис, токи Фуко, на трение и т. д.). Так как процессы модели протекают более быстро, чем процессы оригинала, то необходимо учесть это в моделировании граничных условий, изменив соответственно выдержки времени реле, скорости отключения и т. д.

Моделирование при равенстве частот оригинала и модели. Практически этот способ наиболее удобен, так как дает возможность применить машины нормальной, а не повышенной частоты, и использовать городскую сеть как шины бесконечной мощности. Полная синхронность с оригиналом, даваемая этим способом, облегчает создание подобия граничных условий. Моделирование r и T , вызывающее здесь большие затруднения, может быть при этом осуществлено следующими способами.

Увеличения T и и уменьшения r генератора-мо-

дели можно достигнуть за счет некоторых конструктивных изменений и отступления от обычных соотношений между отдельными размерами машины (продиктованными экономическими и производственными соображениями) и т. д. Однако возможности эти ограничены.

Постоянная времени может быть увеличена при помощи серийного генератора постоянного тока — способа, разработанного автором и описанного ниже. Сопротивление статора могло бы быть уменьшено аналогичным способом, но это встречает ряд затруднений, и значительно легче вместо уменьшения r увеличить $X_{d'}, X_{q'}, X_{d_0}, X_{q_0}$ в одинаковое число раз. Это увеличение возможно произвести как за счет изменения конструкции генератора, так и за счет добавления внешнего реактansa с малым активным сопротивлением. Пусть $T_m = T_0$, а $X_{d'}, X_{q'}, X_{q_0}, X_{d_0}$ увеличено в $n = \frac{r_m}{r_0}$ раз, тогда $X_{d_0}(p)_m = n X_{d_0}(p)_0 \cdot X_{q_0}(p)_m = n X_{q_0}(p)_0$.

При подстановке этих значений в уравнения модели (3)–(4) коэффициент n сокращается, и уравнения модели совпадают с уравнениями оригинала. Подставляя $X(p)_m = n X(p)_0$ в уравнения (2), одновременно изменим масштаб⁹ i таким образом, чтобы $i = \frac{i'}{n}$ (здесь i' — значение тока в новой системе отсчета с измененным масштабом). После этого

$$\text{имеем } \frac{i'}{n} = \frac{G(p)E_0 - \phi_d}{n X_{d_0}(p)_0} \text{ или } i' = \frac{G(p)E_0 - \phi_d}{X_{d_0}(p)_0} \text{ и т. д.}$$

Таким образом уравнения (2) модели после изменения масштаба тока полностью совпадают с уравнениями оригинала. Переходя к уравнению (1), обнаруживаем, что коэффициент n , появившийся в уравнении после подстановки $\frac{i'}{n}$, сократится, если одновременно изменить масштаб механического момента — $M_{мех}$ (формальное изменение) и величину постоянной инерции модели — M_m так, чтобы $M'_m = \frac{M_0}{n}$ (материальное изменение).

На основании такого несложного анализа приходим к выводу, что для модели может быть взят генератор с r и X в n раз большими, чем у оригинала. При этом следует принять $P_{баз} = \frac{1}{n} P_n$ и $I_{баз} = \frac{1}{n} I_n$, а постоянную инерции модели, отнесенную к номинальной мощности, взять в n раз меньше, чем у оригинала.

Приближенное моделирование. Практически в ряде случаев можно не стремиться к точному воспроизведению на модели всех деталей процессов, происходящих в оригинале. Можно ограничиться созданием подобия только наиболее существенных явлений, интересующего нас процесса, допустив неточность в моделировании явлений, влияние которых заведомо мало и может быть оценено из других соображений. Так, если при моделировании генератора не интересоваться сверхпереходными токами, пульсациями момента и поведением генератора при асинхронном ходе, то в большинстве случаев можно упростить основные уравнения (3)–(4), приняв $p\delta = 0; p\phi_d = p\phi_q = 0$ (ниже будет показано теоретически и экспериментально влияние этого допущения и установлено, в каких случаях его нельзя делать). Если упрощенные урав-

⁸ При выражении ее в специальном времени.

⁹ Т. е. будем измерять ток в более мелких единицах.

нения (1)–(4) рассматривать как выражение основных законов моделируемых явлений и применительно к ним установить связь между основными и производными единицами специальной системы единиц, то единицу времени можно рассматривать как основную (независимую) и изменять ее так же, как в предыдущем способе мы изменяли единицы P и I . Благодаря этому появляется еще одна возможность моделирования — можно менять масштаб времени модели независимо от частоты. При этом, разумеется, точно моделируются только периодические составляющие токов и напряжений, отнесенные к ротору¹⁰, аaperиодические составляющие точно моделированы не будут.

Пусть специальная единица времени будет теперь выбрана в n_t раз меньше, чем раньше, и будет определяться как промежуток времени, в течение которого ротор, вращающийся с синхронной скоростью, поворачивается на угол $\delta = \frac{1}{n_t}$ радиана. При записи в новых единицах (t') имеем $t = \frac{t'}{n_t}$; $p = n_t p'$, где p' — новое значение оператора. Теперь перепишем уравнение (1) и выражения $G(p)$ и $X(p)$:

$$\frac{M_m}{M_{мех}} n_t^2 p'^2 \delta - 1 = \frac{i_q \phi_d - i_d \phi_q}{M_{мех}}$$

или, при условии, что $M_m = \frac{M_0}{n_t^2}$,

$$\frac{M_0}{M_{мех}} p'^2 \delta - 1 = \frac{i_q \phi_d - i_d \phi_q}{M_{мех}};$$

$$G(p')_m = \frac{1}{1 + n_t p' T_m}; \quad X(p')_m = \frac{X_d + X'_d n_t p' T_m}{1 + n_t p' T_m}. \quad (3)$$

Если постоянная времени модели в n_t раз меньше, чем у оригинала, — $T_m = \frac{T_0}{n_t}$, то, выбирая $n_t = n_t$ и относя коэффициент n_t в уравнениях (5) к T_m , имеем формальное увеличение постоянной времени, при котором уравнения (5) принимают вид:

$$G(p')_m = \frac{1}{1 + p' T_0}; \quad X(p')_m = \frac{X_d + X'_d p' T_0}{1 + p' T_0}.$$

Уравнения (2) и упрощенные уравнения (3) и (4) не изменятся, но p заменится на p' .

¹⁰ Если периодические составляющие токов и напряжений рассматривать отнесенными к статору, то можно говорить о моделировании огибающих мгновенных значений. Сами мгновенные значения точно моделированы не будут, поскольку в подобных интервалах времени токи и напряжения модели и оригинала будут иметь разное число периодов.

Итак, выразив в уравнениях (1), (5) параметры модели через параметры оригинала, мы доказали полную тождественность уравнений оригинала и модели, получающуюся при условии следующих соотношений между их параметрами: $M_m = \frac{M_0}{n_t^2}$;

$$T_m = \frac{T_0}{n_t}.$$

Вернувшись к записи полных уравнений Парка, легко обнаружить, что уравнения (3) — (4) модели будут отличаться от уравнений оригинала только коэффициентами n_t при $p\phi_d$, $p\phi_q$ и $p\delta$ и, следовательно¹¹, явления, обусловленные этими членами, будут моделированы приближенно.

Приведенных примеров достаточно для уяснения методики нахождения условий подобия, в основных случаях моделирования; давать общие правила и формулы для построения моделей явно нецелесообразно, так как в каждом случае поставленные задачи и условия проведения опытов ясно укажут, по какому пути следует идти. Разумеется, описанные выше способы моделирования на практике должны применяться в комбинациях друг с другом (например, увеличение частоты одновременно с увеличением реактансов и изменением масштаба токов и т. д.). Предлагаемые способы моделирования были проверены на модели, построенной в Энергетическом институте Академии Наук. Описание модели автор намерен дать в отдельной статье.

Литература

1. М. В. Кирпичев и М. А. Михеев. Моделирование тепловых устройств. Изд. Академии Наук СССР, 1936.
2. А. А. Гухман. Физические основы теплопередачи. ОНТИ, 1934.
3. С. А. Лебедев, П. С. Жданов. Устойчивость параллельной работы электрических систем. Энергоиздат, 1934.
4. А. А. Горев. Введение в теорию устойчивости параллельной работы электрических станций.
5. R. H. Park. Two Reaction Theory of Synchronous Machines part I, II. AIEE. Transactions, 1929.
6. К. М. Поливанов. К вопросу о классификации систем единиц. Сборник комиссии по единицам мер. Изд. Академии Наук СССР.
7. К. М. Поливанов. Теория подобия. Физический словарь. Том. IV, ОНТИ. 1938.
8. T. M. Linnell. Starting Performance of salient Poles Synchronous Motors, AIEE, Trans, vol. 49, 1930.
9. В. А. Веников. Моделирование электрических систем при помощи вращающихся машин. „Электричество“ № 9, 1939.
10. J. G. Brainerd and J. Neufeld. Similarity Relations in Electrical Engineering, El. Eng. № 3, 1936.

¹¹ К тем же результатам в этом случае можно прийти, если вместо уравнений Парка рассмотреть уравнения Лонг-лея (9), (10)

Компенсированный реактор¹

Канд. техн. наук Л. И. МОЙЖЕС
Всесоюзный электротехнический институт

С укрупнением электрических систем проблема токов коротких замыканий становится все более сложной. Сверхтоки, протекающие при этом режиме по обмоткам трансформаторов, аппаратам и шинам распределительных устройств, вызывают в них большие усилия. Будучи сколько-нибудь длительными, эти токи влекут за собой недопустимые перегревы проводников. Исключительно сложной является проблема отключения этих токов. Разрывные мощности достигают нескольких миллионов киловольт-ампер, и необходимость быстрого и надежного отключения сверхтоков предъявляет высокие требования к отключающей аппаратуре и релейной защите. Ограничение этих токов безжелезными реакторами с небольшой постоянной индуктивностью не решает вопроса, так как токи все же остаются достаточно большими, а повышение скорости восстановления напряжения, обусловленное включением реакторов, сильно затрудняет работу выключателей.

Попытки создать практически выполнимый аппарат, ограничивающий токи к. з. до небольших величин и одновременно не нарушающий нормальный режим сети, не увенчались до сих пор успехом.

Предлагаемый нами компенсированный реактор дает практически осуществимое решение этой проблемы.

Принципы устройства. Известно, что достаточно большое постоянное магнитное поле, наложенное на переменное поле катушки с железным сердечником, переводит последний в область насыщения и снижает индуктивное сопротивление обтекаемой переменным током катушки до весьма малых величин.

Объясняется это явление весьма просто.

При отсутствии постоянного магнитного поля ампервитки катушки переменного тока колеблются в области, соответствующей высоким магнитным проницаемостям и, следовательно, большим изменениям потока во времени. Наложение достаточно большого постоянного магнитного поля заставляет ампервитки катушки переменного тока колебаться в области насыщения. Тем самым катушка переменного тока переводится в режим с малой индуктивностью.

Эта идея использована в компенсированном реакторе.

С конструктивной стороны компенсированный реактор представляет собой разветвленный железный сердечник с насаженными на него катушками переменного и постоянного тока (рис. 1).

Сердечник выбран разветвленным с той целью, чтобы сумма э. д. с., наводимых в обмотках переменного тока при изменении величины постоянного

тока, — так же, как и сумма магнитных потоков катушек переменного тока, пронизывающих обмотку постоянного тока, — всегда равнялась нулю. Как мы увидим в дальнейшем, последние условия весьма существенны.



При номинальном режиме катушки, насаженные на средний одвоенный стержень, обтекаются постоянным током и компенсируют индуктивное сопротивление катушек переменного тока, насаженных на крайние стержни и соединенных последовательно таким образом, чтобы удовлетворить указанным выше условиям.

При возникновении к. з. постоянное магнитное поле быстро снимается полностью или частично, и индуктивное сопротивление катушек переменного тока возрастает до величин, обусловленных собственными параметрами катушек и остаточным полем постоянного тока.

Зависимость индуктивности реактора от тока нагрузки и тока насыщения. Индуктивность катушки с железным сердечником, начиная от малых значений индукции в железе, падает с ростом протекающего через катушку тока. Это собственно и мешает применению катушек такого рода для токоограничения при к. з.

В противовес этому катушки с железным сердечником, подмагничиваемым постоянным током, вместе с ростом переменного тока повышают свою индуктивность до тех пор, пока величина индукции в железе не превышает 14—15 гс (рис. 2).

На рис. 2 дана зависимость среднеквадратичного значения индукции, умноженного² на $\sqrt{2}$, от

¹ Компенсированный реактор предложен инж. Л. И. Мойжесом, авторское свидетельство 52476.

удельных ампервитков синусоидальной волны переменного тока при различных удельных ампервитках постоянного тока.

Кривые показывают, что индуктивность катушек с железным сердечником при подмагничивании его постоянным током растет вместе с ростом переменного тока.

Вначале индуктивность увеличивается медленно, потом при некотором значении удельных ампервитков переменного тока, зависящем от степени насыщения, она начинает возрастать очень быстро и, наконец, при индукции в железе порядка 15 кГ индуктивность начинает падать сначала медленно, потом более быстро.

Если бы мы продолжили эти кривые до более высоких значений индукции, то увидели бы, как все семейство кривых сливается в одну линию, которая совпадает с кривой, получаемой при отсутствии подмагничивающего постоянного тока, иначе говоря, по достижении этих значений индукции индуктивность не зависит ни от наличия, ни от величины подмагничивающего постоянного тока.

Ограничение первой амплитуды токов к. з. и выбор индукции при режиме к. з. При возникновении к. з. величина первой амплитуды токов к. з. при защите сети компенсированным реактором зависит от момента включения на к. з. и от скорости гашения постоянного магнитного поля.

Если включение на к. з. произошло в наиболее благоприятный момент времени, соответствующий нулю тока, то амплитуда токов к. з. может быть определена следующим образом.

Пусть переменная индукция в железе при режиме к. з., когда к компенсированному реактору приложено все напряжение сети, равна B , а число удельных ампервитков постоянного тока равно aw . Для того чтобы получить число удельных ампервитков тока к. з. aw_k , нужно взять точку пересечения прямой, соответствующей данному значению индукции B , и кривой намагничивания, соответствующей данному значению удельных ампервитков насыщения.

Если одновременно с возрастанием переменного тока будет затухать постоянное магнитное поле, то величина первой амплитуды будет уменьшаться соответственно уменьшению степени насыщения.

При быстром гашении постоянного магнитного поля удается ограничить в наиболее благоприятном случае амплитуду токов к. з. до величины, лишь слегка превышающей амплитуду номинального тока (рис. 3, а).

Совсем иначе протекает явление при неблагоприятном случае включения на к. з., т. е. при включении в момент времени, соответствующий максимуму тока (рис. 3, в).

Магнитный поток не может мгновенно нарасти, и благодаря этому появляется постоянная составляющая магнитного потока, которая при отсутствии затухания приводит к удвоению потока через полпериода после возникновения к. з.

Кроме того, поток, созданный остаточным магнетизмом, тоже может быть направлен в ту же сторону, и весь этот суммированный поток в состоянии так насытить сердечник, что наличие подмагничивающих ампервитков постоянного тока совершенно не скажется на индуктивности компенсированного реактора. Следовательно, скорость

³ Что не соответствует максимальному значению индукции, ибо зависимость индукции от времени не синусоидальна.

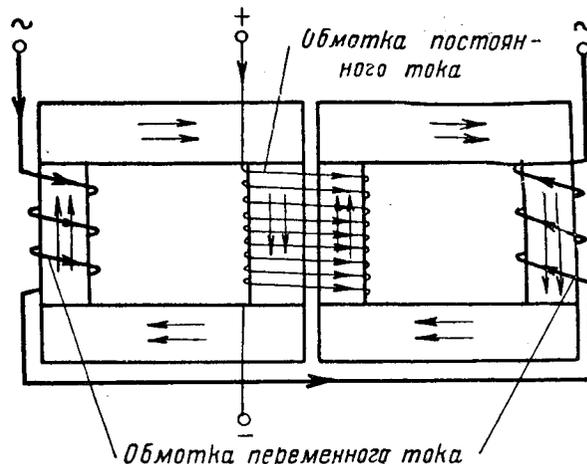


Рис. 1. Конструктивная схема компенсированного реактора

гашения постоянного магнитного поля в этом случае не сказывается на величине первых пиков токов к. з. Величина этих пиков зависит в этом случае, как и в случае включения трансформатора вхолостую, от величины индукции в железе и активного падения напряжения в обмотке переменного тока компенсированного реактора.

Сказанное выше и определяет метод выбора целесообразной величины индукции в железе, которая уже не лимитируется потерями в железе, так как при номинальном режиме железо насыщено. Величина индукции в железе ограничена величиной пиков насыщения, аналогичных пикам включения трансформатора вхолостую.

Численное значение токов к. з. в этом наиболее неблагоприятном случае может быть получено из кривой³ рис. 4, где дана зависимость отношения первого пика тока к. з. к установившемуся току от активного падения в обмотке переменного тока при различных величинах индукции в железе.

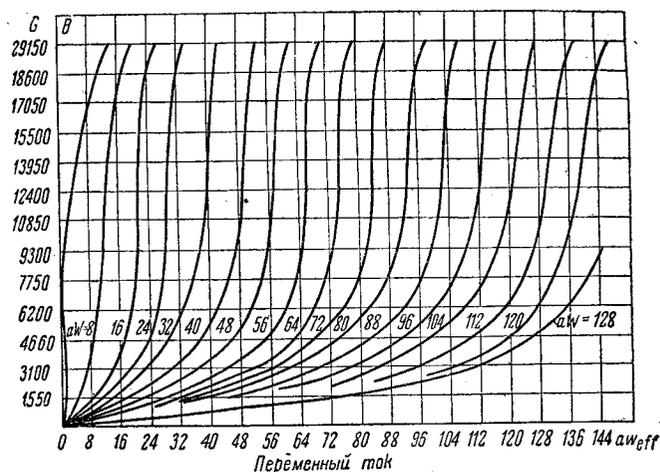


Рис. 2

Величина тока к. з. в сетях с компенсированными реакторами. Выбор наиболее целесообразной величины тока к. з. представляет известные трудности. При выборе оптимального значения этого тока необходимо учесть как вопросы отключения

³ Кривая взята из книги Рюденберга „Явления неустановившегося режима в электрических установках“. В названной книге эта кривая служит для определения максимально возможных пиков насыщения при включении трансформаторов вхолостую.

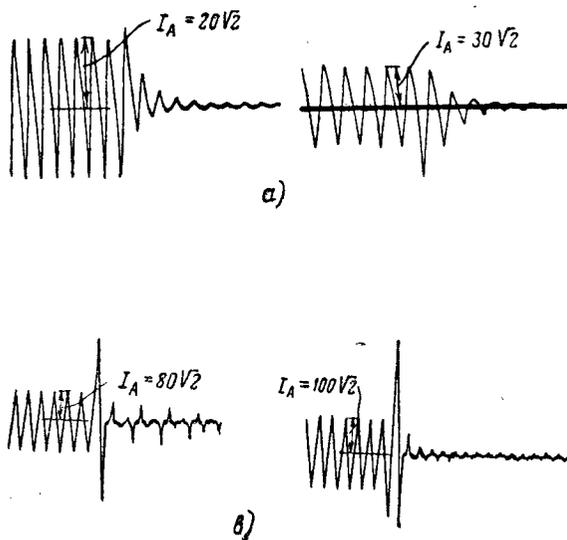


Рис. 3

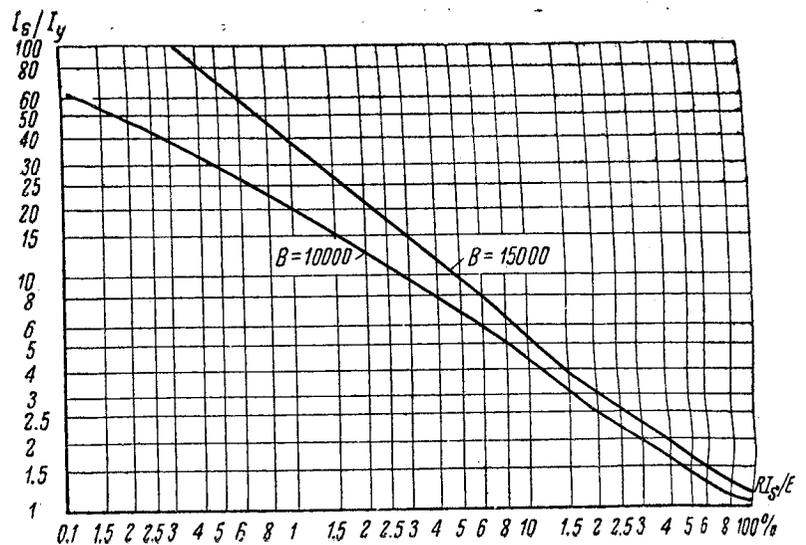


Рис. 4

и релейной защиты, так и вопросы стоимости самого компенсированного реактора.

Для отключения наиболее оптимальным в данном случае является ток, немногим превосходящий ток допустимой перегрузки отключаемого участка.

Этот ток, который выключатели должны отключать многократно и надежно в рабочем режиме, не предъявляет к аппаратуре дополнительных требований в режиме к. з.

Для релейной защиты выбор таких токов к. з., составляющих 1,25—1,5 от рабочего тока отключаемого участка, также весьма желателен, так как сохраняет существующую максимальную защиту, по крайней мере у абонентов.

Компенсированный реактор, как и существующие реакторы, включается, главным образом, на отходящих фидерах районных подстанций. При этом возможны к. з. как в кабеле, идущем от фидера, так и на каком-либо из ответвлений. При к. з. в кабеле, идущем от фидера, должен отключить фидерный выключатель, при к. з. на ответвлении — выключатель, стоящий у абонента.

Разберем сначала последний случай.

Как уже было указано раньше, наиболее оптимальным током для отключающей аппаратуры и релейной защиты является ток, равный примерно 1,25 от рабочего тока отключаемого участка. Отношение тока ответвления к току фидера не превышает обычно 0,3—0,4. Следовательно, ток к. з. должен составлять $1,25 \cdot 0,4 = 0,5$ от тока фидера, т. е. наиболее целесообразно с этой точки зрения выбрать ток к. з., равный половине рабочего тока фидера.

Для получения наиболее экономического компенсированного реактора ток к. з. при полном гашении магнитного поля постоянного тока в режиме к. з. должен составлять примерно 10% номинального тока.

Таким образом получается противоречие между требованиями, диктуемыми сетью (ток к. з. должен составлять 50% от номинального тока), и требованиями, диктуемыми желанием получить наиболее дешевый компенсированный реактор (ток к. з. должен составлять 10% от номинального тока).

Это противоречие разрешается довольно просто. Вместо полного гашения магнитного поля постоянного тока при к. з. гасится лишь часть магнитного поля. Остающееся магнитное поле постоянного

тока должно быть рассчитано таким образом, чтобы ток к. з. составлял 50% от номинального тока фидера.

При этом попутно получается ряд преимуществ с точки зрения простоты управления компенсированным реактором.

1. Резко уменьшается время для наложения магнитного поля постоянного тока после отключения закороченного участка (что равносильно ускорению повторного включения выключателя). Важно отметить, что время уменьшается отнюдь не пропорционально величине накладываемого постоянного тока, а значительно резче, в соответствии с характером нарастания тока в индуктивных цепях с железом, которое сначала идет очень медленно (при токах, соответствующих высоким магнитным проницаемостям), а потом весьма быстро.

2. После отключения закороченного участка, но еще до наложения постоянного магнитного поля на шинах появляется напряжение, составляющее 40—50% от номинального. Последнее обстоятельство весьма важно при моторной нагрузке, так как тем самым создаются исключительно благоприятные условия для ввода нагруженных моторов в нормальный режим работы после перерыва в подаче напряжения, связанного с к. з. Это обстоятельство было отмечено комиссией по проведению испытаний в системе Ленэнерго как особо положительный фактор, позволяющий сетям избавиться от толчков тока при включении нагруженных моторов после к. з. и дающий возможность в связи с этим увеличить допустимое время перерыва тока без последующего останова моторов.

Для некоторых нагрузок, наоборот, важна быстрая подача полного напряжения после к. з. В этом случае время нарастания поля при напряжении, равном напряжению питания обмотки постоянного тока (от 24 до 110 В), может оказаться слишком большим. Для этого трансформатор, питающий через купроксный выпрямитель обмотку постоянного тока, делается с падающей характеристикой, дающей возможность иметь при меньших токах большее напряжение трансформатора. Это сильно ускоряет процесс наложения поля. Приложенные осциллограммы показывают скорость этого процесса в трансформаторах с обычной и падающей характеристикой (рис. 5).

В том случае, когда к. з. произошло в кабеле,

идущем от фидера, или в случае несрабатывания выключателя, стоящего на ответвлении, должен отключить фидерный выключатель.

Ток к. з. для этого выключателя составляет 50% рабочего тока, и обычная максимальная защита непригодна. Это побудило сконструировать новое реле (рис. 6).

Якорь этого реле удерживается в положении, указанном на рисунке, пружиной и катушкой, питающейся или от трансформатора напряжения, стоящего за реактором, или постоянным током, сериесно обмотке возбуждения компенсированного реактора. При к. з. ток в этой катушке падает (в одном случае вследствие падения напряжения в фидере, в другом — вследствие гашения поля постоянного тока). Тогда токовая катушка притягивает якорь и замыкает цепь отключающей катушки выключателя.

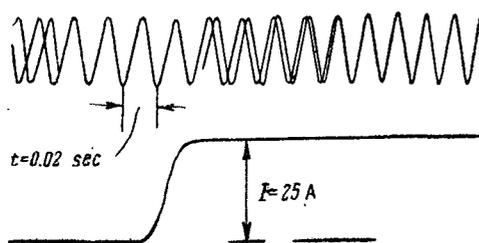
Схема управления реактора. В соответствии со сказанным выше схема управления компенсированного реактора должна обеспечить: 1) питание обмотки постоянного тока при номинальном режиме; 2) быстрое гашение магнитного поля постоянного тока при к. з.; 3) автоматическое наложение магнитного поля постоянного тока после отключения закороченного участка.

Обмотку постоянного тока можно питать от индивидуального или группового источника.

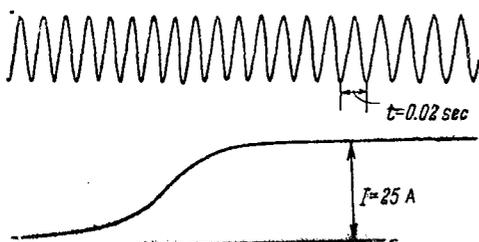
Принципиально обмотку постоянного тока можно питать от любого генератора или выпрямителя. В настоящее время наиболее надежным и долговечным источником, требующим к тому же минимальный уход, является купроксный выпрямитель, и в нашей схеме мы его и выбрали.

Постоянный ток должен быть примерно пропорционален току нагрузки для того, чтобы индуктивное падение напряжения на компенсированном реакторе оставалось постоянным. Регулировку постоянного тока можно производить либо вручную, либо автоматически.

Автомат для гашения постоянного магнитного поля осуществляется с достаточным быстродействием (собственное время 3—5 msec, полное время отключения тока — 15—20 msec).



б)



а)

Рис. 5

Реагентом для отключения автомата во время к. з. является катушка магнитного шунта автомата (рис. 7), последовательно соединенная с обмоткой постоянного тока компенсированного реактора. При к. з. увеличивающийся переменный ток (в первые полупериоды) уменьшает среднее значение магнитного поля в железе реактора. Следствие этого ток в обмотке постоянного тока увеличивается, чтобы поддержать среднее значение магнитного поля на прежнем уровне.

Этот увеличенный ток, обтекающий также катушку магнитного шунта автомата, поле которой направлено в якорь навстречу полю удерживающей катушки, и производит отключение.

Выше было указано, что по соображениям релейной защиты и повторного наложения поля наиболее удобно оставить известную часть магнитного поля постоянного тока и во время к. з. В связи с этим контакты автомата шунтированы сопротивлением, величина которого определяется желаемой величиной установившегося тока к. з.

Повторное включение автомата после отключения закороченного участка производится от реле напряжения, замыкающего цепь включающей катушки автомата. Для срабатывания этой катушки достаточно 30—40% номинального напряжения, т. е. напряжения, установившегося на шинах после отключения закороченного участка, но до наложения полного магнитного поля постоянного тока. Время наложения магнитного поля постоянного тока определяется характером нагрузки. В том случае, когда требуемое время наложения поля меньше того, которое получается при наложении поля от напряжения на обмотке возбуждения при номинальном режиме, трансформатор, питающий купроксный выпрямитель, делается с падающей характеристикой.

Как видно из изложенного, предложенная нами схема управления компенсированного реактора является простой и надежной, что нашло свое отражение и в заключении комиссии, выделенной НКЭП для проведения сетевых испытаний компенсированного реактора в системе Ленэнерго.

Компенсированный реактор конструктивно осуществлен в виде двух пятистержневых сердечников (рис. 8), на которые наложены обмотки постоянного и переменного тока, на одних и тех же стержнях.

Место компенсированного реактора в сетях и экономическая сторона проблемы. Как уже было сказано выше, основным местом установки компенсированного реактора являются отходящие фидеры районных подстанций.

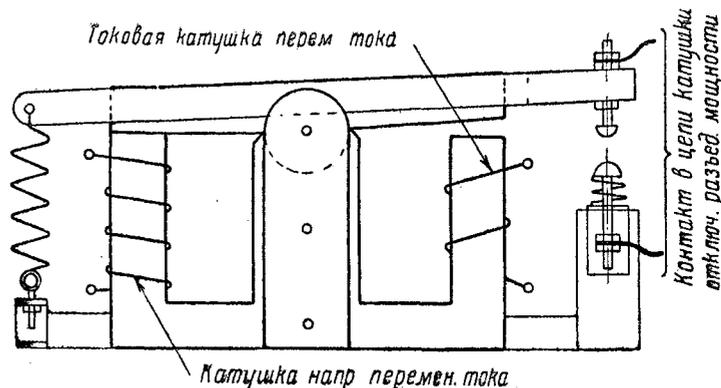


Рис. 6

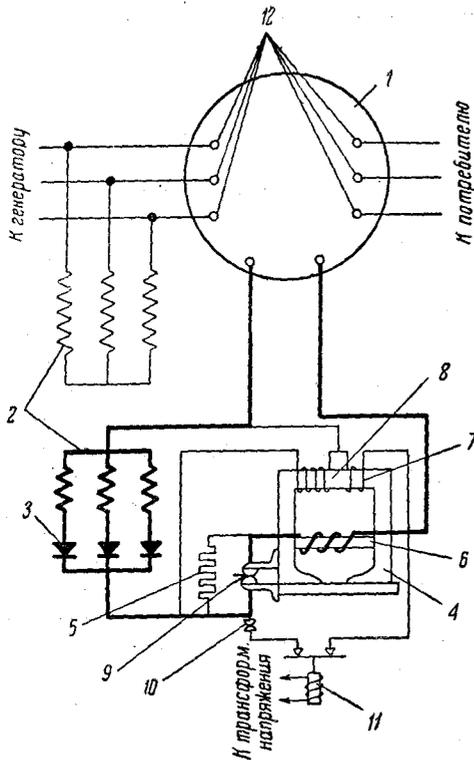


Рис. 7

1 — компенсированный реактор; 2 — трансформатор; 3 — купроксный выпрямитель; 4 — быстродействующий автомат; 5 — шунтирующее сопротивление; 6 — отключающая, 7 — включающая и 8 — удерживающие катушки; 9 — размыкающие контакты; 10 — блокировочный контакт; 11 — реле напряжения; 12 — выводы обмоток переменного и постоянного тока

В настоящее время установка реакторов на промышленных предприятиях — довольно редкое явление. Таким образом как в случае компенсирован-

ных реакторов, так и в случае установки обычных реакторов потребитель получает реактированный ток. Разница лишь та, что при установке компенсированных реакторов потребитель освобождается от необходимости ставить дорогостоящие и громоздкие силовые выключатели (масляные или другие) и заменяет их разъединителями (простыми, дешевыми и в высокой степени надежными аппаратами, рассчитанными на отключение рабочего тока или тока перегрузки.

Во многих случаях подводящие кабели, шины, разъединители, трансформаторы тока и прочая аппаратура выбираются не из условий рабочего режима, а по току к. з. Установка компенсированных реакторов полностью снимет проблему электродинамической и термической устойчивости, и выбор аппаратуры, кабелей и шин определится исключительно рабочим режимом.

Сети в свою очередь при наличии компенсированных реакторов полностью освобождаются от толчков тока и какой бы то ни было посадки напряжения на шинах в случае к. з. у абонентов.

Экономическая сторона проблемы определяется сказанным выше. При установке компенсированных реакторов мы получаем следующие экономические выгоды: 1) удешевленную отключающую аппаратуру; 2) удешевление строительства подстанции за счет взрывоопасных камер для выключателей, в которых отпадает необходимость; 3) снижение стоимости кабелей, шин и аппаратов, выбранных из расчета электродинамической и термической устойчивости.

Необходимо, однако, наряду с этим отметить, что сам компенсированный реактор стоит при наружной установке в два с лишним раза дороже

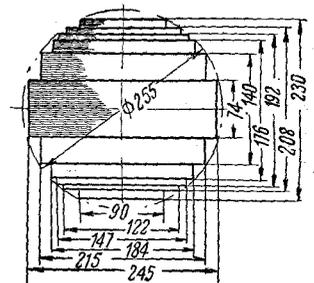
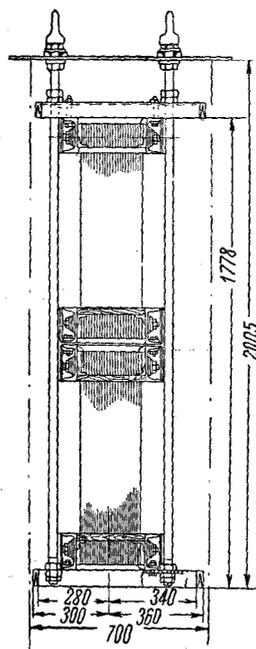
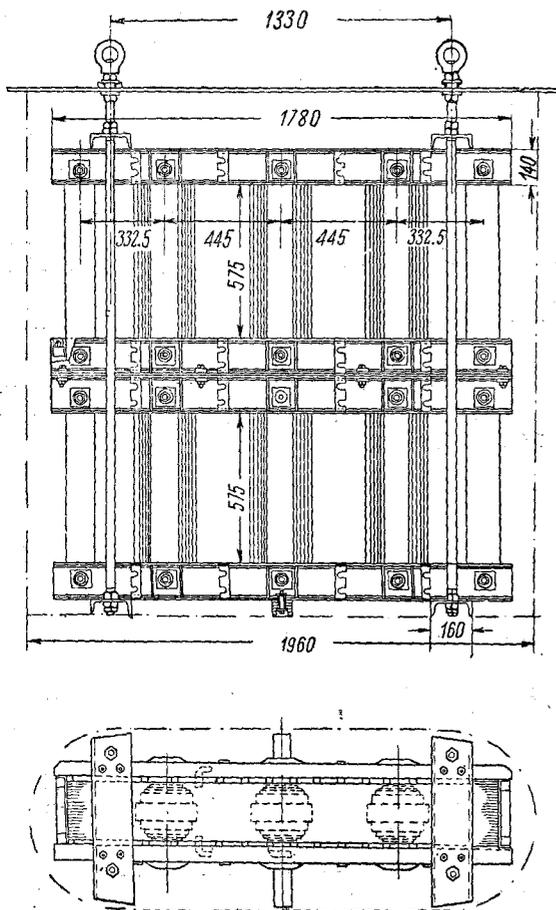


Рис. 8

бетонных реакторов, включая стоимость ячеек, в которых они установлены.

Экономические подсчеты, проделанные нами для конкретных случаев, показывают, что общая сумма капитальных затрат при наличии компенсированного реактора все же меньше, чем при обычных реакторах. Кроме того, нужно учесть те экономические выгоды, которые получают подстанции в связи с эксплуатационными преимуществами компенсированного реактора и уменьшением числа и развития аварий.

Испытание компенсированного реактора. Компенсированный реактор системы автора испытывался на стенде завода «Электроаппарат» на Южной подстанции Ленэнерго. Испытание ставило перед собой следующие задачи:

1. Проверить возможность токоограничения компенсированным реактором в мощных сетях пиковых значений тока к. з. до величин, не превосходящих 5—6-кратных значений от номинального тока.

В части установившихся токов к. з. многократные испытания в ВЭИ показали, что они составляют при полном снятии магнитного поля величину порядка 10% от номинального тока. Испытания в сетях Ленэнерго должны были подтвердить это и проверить надежность схемы управления, переводящую реактор в режим высокой реактивности.

2. Второй задачей являлся подбор максимально допустимых значений индукций в железе, самым тесным образом связанным с пиковыми значениями тока к. з. Для возможности реализации такого подбора при изготовлении реактора были устроены три отвода, соответствующие трем значениям максимальной индукции в железе: 12, 14 и 16 кГ.

Испытания компенсированного реактора производились на стенде по следующей схеме.

От Южной подстанции Ленэнерго через выключатель МКП-160 подавалось напряжение 110 кВ к двум группам однофазных трехобмоточных трансформаторов мощностью 10 000 кВА в фазе. От 6-кВ обмотки трансформаторов через выключатель МГГ-229 подавалось напряжение к компенсированному реактору. Закорачивающий выключатель или разъединитель мощности по схеме должен был стоять за компенсированным реактором. Однако из чисто монтажных соображений иногда делались отступления от схемы, и закорачивающий выключатель или разъединитель мощности ставился впереди компенсированного реактора, а «закоротка» ставилась на анцапфы самого реактора.

Питание обмотки возбуждения реактора постоянным током производилось при напряжении 25 В от специального агрегата, состоящего из двигателя постоянного тока 220 В и генератора постоянного тока 25 В, 200 А. Питание производилось через быстродействующий автомат, назначение которого заключалось в быстром гашении поля при к. з.

В соответствии с указанной задачей конструкция автомата имеет следующие особенности.

Магнитная система автомата состоит из основно-

го магнитопровода, на котором расположена удерживающая катушка, производящая включение, и катушка, удерживающая подвижной якорь в притянутом положении. Кроме основного сердечника, имеется еще сердечник, через который может замыкаться, минуя якорь, часть потока удерживающей катушки. Величина потока, ответвляющегося в этот сердечник, зависит от числа ампервитков катушки, расположенной на этом сердечнике. На сердечнике расположена катушка, серийно обтекаемая током возбуждения реактора, и нормально ее действие недостаточно для того, чтобы произошло отключение. Но в момент к. з. в цепи возбуждения реактора происходит увеличение тока, которое объясняется следующим образом: как известно, появление переменного тока в цепи с подмагничиванием вызывает в ней уменьшение среднего значения индукции. Однако такое уменьшение индукции не может произойти сразу, и вследствие этого в цепи постоянного тока должен появиться ток, направленный на поддержание среднего значения индукции прежней величины. Этот увеличенный ток, обтекая серийную катушку автомата, воздействует на его отключение.

При испытаниях осциллографировались два тока в двух фазах, два линейных напряжения и постоянный ток.

Первые испытания производились при наибольшем числе витков, минимальной индукции в железе и при одной включенной группе трансформаторов.

Было сделано 4 трехфазных и 3 двухфазных к. з. Пиковое значение тока только в одном случае достигло 1700 А амплитудных. Во всех других случаях пиковые значения тока были гораздо меньше. Получить эффективное значение первой полуволны делением пикового значения тока на $\sqrt{2}$ нельзя, так как форма тока при приложенном синусоидальном напряжении резко несинусоидальна. Вследствие этого эффективное значение тока будет гораздо меньше, чем $\frac{1}{\sqrt{2}}$.

Значение первой пика тока к. з. зависит при данном напряжении от момента включения и направления остаточного магнетизма. Например, сравнивая осциллограммы *a* и *b* рис. 9, мы видим, что в обоих случаях в фазе I к. з. произошло при максимальном значении тока, т. е. в наиболее неблагоприятный момент времени. Тем не менее значение первого пика тока на осциллограмме *a* в фазе I равно 645 А, в то время как на осциллограм-

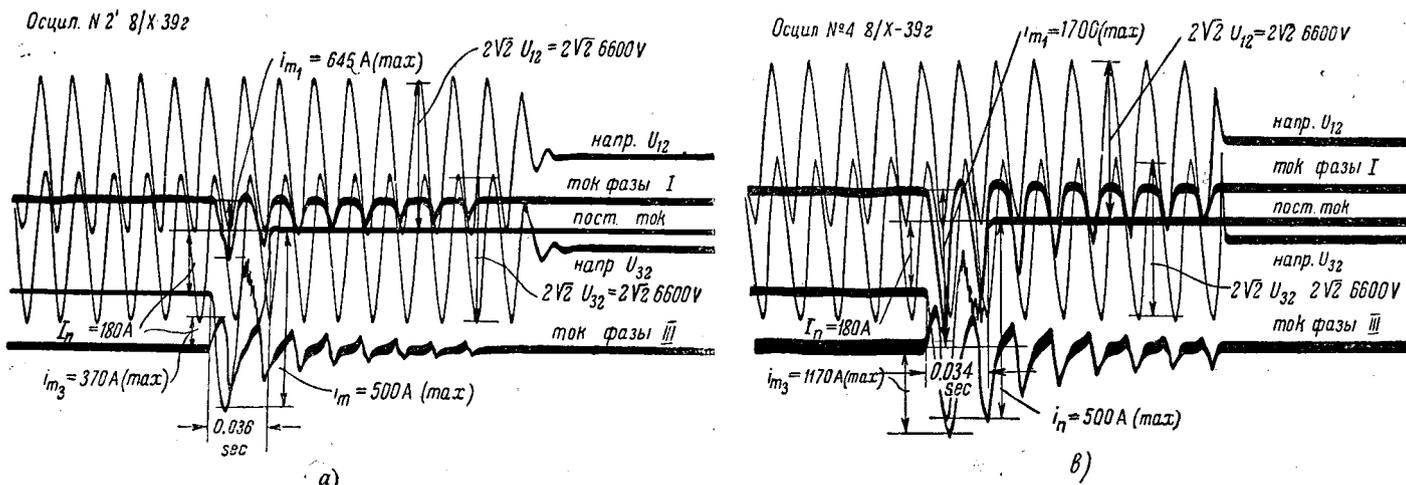


Рис. 9

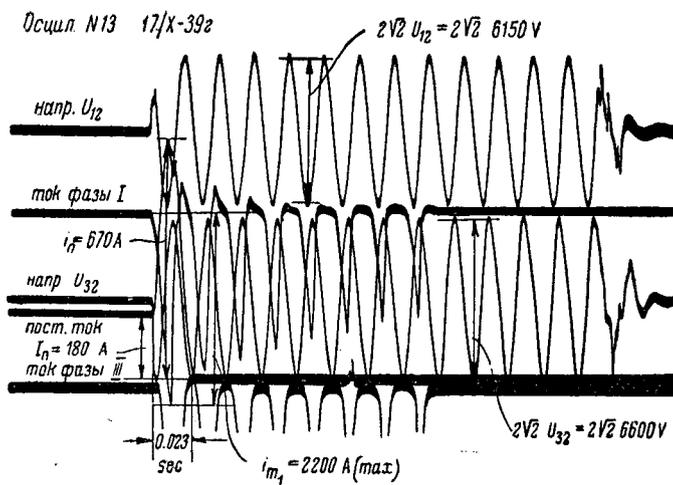


Рис. 10

ме b пик тока в той же фазе равен 1700 А. Эта разница в токах объясняется тем, что в первом случае остаточный магнетизм был направлен в железе против направления тока, и, следовательно, постоянная составляющая потока, а вместе с ней и ток должны были быть гораздо меньше, чем во втором случае, когда остаточный магнетизм оказался направленным по току.

Уже первые опыты показали, что увеличение постоянного тока во время к. з. дает достаточно надежный реагент для отключения. В самом деле прилагаемые осциллограммы показывают, что увеличение постоянного тока происходило на 80% и больше. Имевшийся в наличии быстродействующий автомат давал возможность с помощью двух винтов, изменявших сопротивление магнитного пути удерживающей катушки, совершенно точно регулировать ток отключения, величина которого устанавливалась равной 230 А. Время отключения постоянного тока от момента подачи команды до полного снятия поля нас вполне удовлетворяло.

При среднем числе витков ($B = 14$ кГ) было сделано 6 трехфазных и 4 двухфазных к. з.

Максимальная пика тока к. з. только в одном случае достигла 1600 А. То обстоятельство, что максимальная пика тока при среднем числе витков оказалась меньшей, чем при максимальном их числе, следует объяснить тем, что не удалось получить во втором случае наименее благоприятный момент к. з. Однако характер осциллограмм показывает, что увеличение максимальной индукции с 12 до 14 кГ незначительно сказывается на величине и характере пик тока к. з.

При наименьшем числе витков, соответствующем максимальной индукции (16 кГ), было сделано 6 трехфазных и 5 двухфазных к. з. Максимальное значение первого пика тока к. з. составляло в этом случае 2200 А (рис. 10). С точки зрения возможного пика тока к. з. ток в 2200 А еще очень далек от тех токов, которые могли бы представлять хоть какую-нибудь опасность с точки зрения электродинамической. Однако осциллограммы показывают, что длительность этих пиковых значений тем больше, чем больше индукция в железе, и, повидимому, этот переходный режим происходит при таких высоких индукциях в железе, где влияние тока подмагничивания ничтожно.

В самом деле, та же осциллограмма рис. 10 показывает, что постоянный ток был отклю-

чен в данном случае в 0,028 сек, между тем как длительность спада пиков тока к. з. была значительно большей, и характер этих пиков был точно такой же, как при включении обычного трансформатора вхолостую. В дальнейшем мы поставили опыт (о котором будет сказано ниже) с включением компенсированного реактора накоротко без подмагничивания, и, как нужно было ожидать, величина пиков тока к. з. и характер их при этом сколько-нибудь существенно не изменились.

Таким образом для подбора величины максимальной индукции в железе получился в результате опытов материал, который нам поможет при конструировании компенсированных реакторов.

Нужно вместе с тем указать, что в реальных условиях пики токов к. з. будут еще меньше, а затухание значительно больше благодаря наличию активного сопротивления в сети, которое на стенде сведено до минимума.

Дальнейшие испытания производились при двух группах трансформаторов. Как и следовало ожидать, никаких изменений в связи с этим в величине токов к. з. не произошло, так как реактивность компенсированного реактора в режиме к. з. (переходном и установившемся) значительно больше реактанса трансформаторов и сети. Таким образом можно, рассчитывая токи к. з. при наличии компенсированного реактора исходить из сети бесконечно большой мощности.

На осциллограмме рис. 11 мы видим случай, когда компенсированный реактор включался накоротко, без предварительного подмагничивания.

Как видно из осциллограммы, величины пиков (880 и 900 А) и характер затухания не отличаются существенно от обычного случая к. з. при наличии возбуждения. Все это подтверждает сделанные нами теоретические предположения, что в наиболее неблагоприятных случаях величины пиков тока к. з. при обычных индукциях в железе очень слабо должны зависеть от тока подмагничивания. Интересно в связи с этим заметить, что в компенсированном реакторе значение максимально возможных токов к. з. не зависит от величины реактанса при номинальном режиме, который может изменяться увеличением или уменьшением тока подмагничивания.

Выводы. В заключение приведем выводы комиссии НКЭП, проводившей испытания компенсированного реактора в системе Ленэнерго:

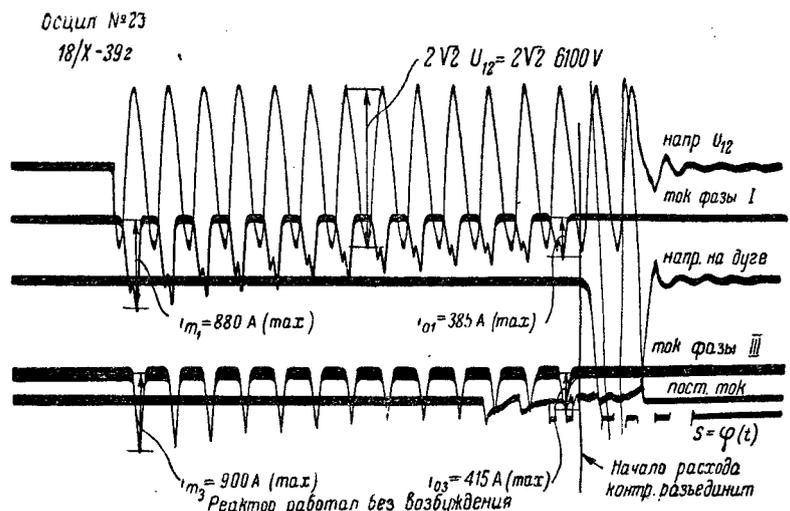


Рис. 11

«Компенсированный реактор системы инж. Мойжеса при испытаниях в Ленинградской сети показал, что:

а) первые амплитуды и установившиеся значения токов к. з. совпадают с расчетными и по своей величине являются столь малыми, что проблемы термической и динамической устойчивости аппаратуры при к. з. для защищенных компенсированным реактором участков сети совершенно отпадают;

б) наличие компенсированного реактора и правильной работы схемы его управления гарантирует здоровую часть сети до реактора от толчков и какой бы то ни было посадки напряжения;

в) схема управления компенсированного реактора, приводящая в действие автомат для гашения поля, проста и надежна.

Исходя из этого, комиссия считает, что компенсированный реактор системы инж. Мойжеса является аппаратом, применение которого резко уменьшило бы число и развитие аварий при к. з., связанных с выходом из строя оборудования и, следовательно, повысило бы надежность сетей.

Комиссия считает в принципе доказанной возможность перехода в случае применения компенсированных реакторов к облегченной аппаратуре вплоть до замены масляных выключателей разъединителями мощности.

Вместе с тем сведение токов к. з. к величинам, близким к номинальным, сможет значительно облегчить кабели и шины в тех случаях, когда их сечение определяется термической и динамической устойчивостью.

Применение компенсированного реактора позволяет поддерживать постоянным напряжение при изменениях нагрузки регулировкой тока в обмотке возбуждения.

Важно отметить, что ограничивающая роль реактора при к. з. при этом не меняется.

В связи с тем, что при наложении постоянного магнитного поля после к. з. скорость нарастания напряжения может быть произвольно регулируется, применение компенсированного реактора разрешает увеличить допустимое время перерыва для повторного включения в случае моторной нагрузки».

Электронно-ионные регуляторы напряжения

Инж. Л. С. ГОЛЬДФАРБ

Всесоюзный электротехнический институт

Регуляторы генераторного напряжения предназначены преимущественно для поддержания постоянства напряжения на шинах станции.



напряжения дежурный по щиту обычно устанавливает независимо от нагрузки, наибольшее возбуждение, дабы обеспечить устойчивую работу при толчках нагрузки. Это излишнее возбуждение вызывает дополнительные потери и нагрев машины. Кроме того, регулятор исключает необходимость в частой перестановке реостата возбуждения. Число ступеней переключения на трансформаторах можно также уменьшить и тем самым удешевить оборудование подстанций.

Регуляторы генераторного напряжения находят применение не только в крупных электрических системах, но и значительно большем количестве в изолированных системах с одним или несколькими генераторами.

В настоящее время существует целый ряд типов регуляторов напряжения. Табл. 1 дает представление об их разнообразии, характеристиках и области применения.

Практическое применение электронных и ионных ламп для целей плавного регулирования машин получило широкое развитие после того, как преимущества этого способа регулирования стали известны широкому кругу специалистов.

Эти преимущества заключаются в следующем:

- 1) большая точность регулирования (выше 0,5%);
- 2) отсутствие зоны нечувствительности;
- 3) большая скорость регулирования;
- 4) отсутствие подвижных частей;
- 5) минимальное время обслуживания в эксплуатации (требуется лишь регулярная смена ламп);
- 6) небольшая стоимость;
- 7) небольшое потребление мощности в измерительной цепи регулятора;
- 8) легкость введения противоколебательных средств и получения специальных динамических характеристик, обеспечивающих быстродействие и стабильную работу регулятора;
- 9) малая

Тип регулятора	Принцип действ. измер. элемента	Регулирование возбуждения	Регулирование в цепи возбуждения генератора или возбудителя		Максимальная мощность генератора (ориентиров.)		Минимальный статизм %		Зона нечувствительности %	Время, необходимое для обслуж. в относит. един.	Область применения
			перем. ток	пост. ток	перем. ток, kVA	пост. ток, kW	перем. ток	пост. ток			
Вибрационный	э. м.	в. к.	Возбуд.	Генер. возбуд.	20 000	20	1	1	$\pm 0,2 \div 0,3$	10	цэс; пром. устан. То же
Реостатный	э. м.	р.	Генер. возб.	То же	Не ограничена		1	1	$\pm 0,3 \div 0,5$	3	То же
Реостатно-вибрационный	э. м.	в. к.	Генер. возб.	"	"	"	1,5	—	$\pm 0,3 \div 0,5$	4	цэс; подст.
Угольный	э. д.	р	То же	Генер.	2000	50	3	3	$\pm 0,5 \div 0,7$	2	пром. устан. мал. ст.
Электронный	к	э. л.	Возбуд. генер.	Возбуд. То же	500	500	0,15	0,1	0	1	пром. устан. лаб.
Электронно-ионный	к н. м.	и	Возбуд. генер.	То же	Не ограничена		0,15	0,1	0	1	цэс; подст. лаб. пром. устан. мал. ст.

Обозначения: э. м. — электромагнитный; э. д. — электродинамический; к — компенсационный; н. м. — нелинейный мост; в. к. — вибрирующие контакты; р — реостат; э. л. — электронные лампы; и — ионные приборы.

чувствительность к перегрузкам, к тряске и изменению положения.

Теоретические исследования С. А. Лебедева [1] и последующая экспериментальная проверка в лаборатории и на генераторе мощностью в 50 MVA [2] показали, что генератор, снабженный электронно-ионным регулятором напряжения, не имеет зоны нечувствительности, устойчиво работает в зоне искусственной устойчивости, т. е. при углах δ между э. д. с. холостого хода и напряжением шин бесконечной мощности, превосходящих 90° . Это обстоятельство позволяет значительно увеличить — в 1,2—1,5 раза — предел передаваемой мощности, если он ограничен условиями статической устойчивости.

Применение электронно-ионных регуляторов напряжения решает, следовательно, две задачи — поддержания постоянства напряжения и повышения устойчивости параллельной работы электрической системы. Решение той и другой задачи связано с повышением «качества» электрической энергии, увеличением надежности работы системы и, наконец, с уменьшением расходов на оборудование.

Основные элементы электронно-ионного регулятора напряжения. Электронно-ионный регулятор напряжения состоит из четырех основных элементов (рис. 1): 1) измерительного, 2) усилительного, 3) силовой части и 4) элемента обратной связи — противоколебательного элемента.

Измерительный элемент является одной из важнейших частей регулятора. Его задачей является создать на выходе напряжение, пропорциональное отклонению регулируемого напряжения от заданного значения. От выбора типа измерительного элемента в значительной мере зависит качество работы регулятора.

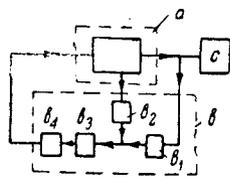


Рис. 1. Скелетная схема регулятора напряжения.

а — регулируемый объект; в — регулятор; с — нагрузка; δ_1 — измерительный элемент; δ_2 — элемент обратной связи, δ_3 — усилительный элемент δ_4 — силовой элемент

В настоящее время в технике регулирования применяют два основных метода измерения — компенсационный и параметрический.

На рис. 2, а приведена схема измерительного элемента, работающего на компенсационном принципе. Регулируемое напряжение выпрямляется (в случае переменного тока) и сравнивается с напряжением батареи В. Разность этих напряжений подается к усилительному элементу. Величина поддерживаемого напряжения устанавливается при помощи потенциометра г (вместо батареи можно применить стабилизированное напряжение сети). Точность работы такого измерительного элемента определяется постоянством напряжения батареи или другого источника. Обычно клеммы а, в подключаются к сеточной цепи лампы, и батарея В практически работает без потребления.

Коэффициент усиления μ компенсационной схемы равняется $2 \cdot \frac{U_2}{100}$, где U_2 — регулируемое напряжение.

Под коэффициентом усиления мы понимаем здесь число вольт на выходе измерительного элемента, приходящееся на 1% изменения регулируемого на-

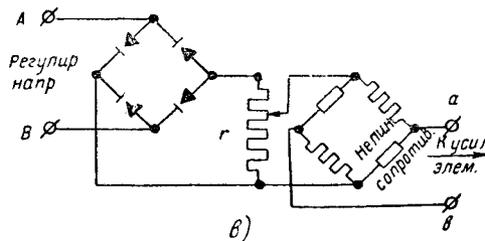
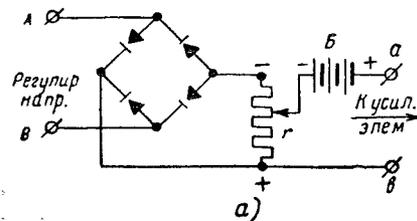


Рис. 2

пряжения. В большинстве случаев трансформированное напряжение генератора $U_z = 100 \text{ V}$ и коэффициент усиления $\mu = 1$.

При использовании в измерительном элементе параметрического принципа измеряемое напряжение подается на мост (рис. 2, в), составленный в общем случае из нелинейных и линейных сопротивлений. Мост сбалансирован только при вполне определенном значении напряжения на входе. При отклонении напряжения от этого значения в ту или иную сторону на выходе моста появляется напряжение, полярность которого зависит от знака отклонения. В качестве нелинейных сопротивлений могут быть использованы — угольные и вольфрамовые лампы накаливания, тирит, лампы тлеющего разряда, феррорезонансные контуры (на переменном токе), электронные лампы в насыщенном режиме и т. д.

Коэффициент усиления измерительных элементов зависит от характеристик использованных нелинейных сопротивлений. В табл. 2 приведены коэффициенты усиления моста для ряда нелинейных сопротивлений. Там же указаны постоянные времени в секундах, определяемые тепловой инерцией элементов.

Таблица 2

Элементы моста		Приведенный коэффициент усиления * $a_0 = \mu \frac{100}{U_{\text{н}}}$	Постоянная времени запаздывания sec
Одна пара плеч	Другая пара		
Вольфрамовые лампы	Линейное сопротивление	0,26	0,1
Вольфрамовые лампы	Угольные лампы	0,33	0,4
Тирит	Линейное сопротивление	0,6	0
"	Вольфрамовые лампы	0,75	0—0,1
В одном плече насыщенная лампа с накалом, зависящим от регулируемого напряжения	В остальных плечах линейные сопротивления	12—25	0,1

* $U_{\text{н}}$ — напряжение, питающее мост, в В.

Приведенные в таблице данные следует считать ориентировочными, они варьируются в зависимости от напряжения питания, типа ламп и тирита.

Усилительный элемент усиливает напряжение, получаемое от измерительного элемента (если это необходимо), и управляет средним током тиратронов.

Для управления тиратроном используются различные варианты следующих двух основных методов — изменение постоянной слагающей на сетке при наличии или отсутствии переменной составляющей; изменение сдвига фаз сетевого напряжения по отношению к анодному. При втором методе часто применяется схема с электронным управлением сдвигом фаз, показанная на рис. 3.

Эквивалентное сопротивление $R_{\text{эк}}$ лампы L зависит от управляющего напряжения U_d . Из векторной диаграммы следует, что с изменением $R_{\text{эк}}$ вектор напряжения U_a , оставаясь постоянным по величине, изменяет лишь свою фазу по отношению к напряжению U . Напряжение U_a подается на сетку тиратронов, а напряжение, обратное по фазе U , подается на аноды тиратронов. При возрастании, например, потенциала на сетке лампы L умень-

шается $R_{\text{эк}}$, и сдвиг фаз сетевого напряжения U по отношению к анодному ($-U$) также уменьшается; среднее значение выпрямленного напряжения тиратронов при этом возрастет.

Силовой элемент. В зависимости от мощности возбуждения генератора и заданного диапазона регулирования выбирается схема силового элемента. В силовом элементе используются управляемые ртутники с сеткой, тиратроны со средним значением силы тока от 0,5 до 100 А на напряжения от 0,3 до 3 кВ и электронные лампы. Схемы выпрямления — обычно двухполупериодные. Применяются также схемы с одним управляемым газовым прибором и газотроном, шунтирующим обмотку возбуждения. Лишь при больших мощностях возбуждения останавливаются на 3- или 6-фазном выпрямлении.

Элемент обратной связи (противоколебательный элемент). Для стабилизации процесса регулирования на усилительный элемент регулятора вместе с напряжением выхода измерительного элемента подается также и производная напряжения возбудителя. Элемент регулятора, создающий эту производную, мы в дальнейшем будем называть элементом обратной связи. Производная может быть получена либо в схеме RL , либо в схеме RC , в регуляторах напряжения применяются обе схемы.

Действие элемента обратной связи заключается в следующем. С увеличением напряжения генератора регулятор напряжения действует через возбудитель на уменьшение возбуждения генератора. Однако благодаря запаздыванию это уменьшение продолжается даже после того, как напряжение генератора восстановилось до своего начального значения, так что в результате напряжение продолжает падать. Возникает обратный процесс с перерегулированием и, таким образом, появляются качания.

Элемент обратной связи снижает скорость реагирования регулятора и тем самым предотвращает возникновение колебаний; когда возбудитель начинает уменьшать возбуждение генератора, на выходе элемента обратной связи возникает напряжение, которое через усилительный элемент регулятора действует в сторону увеличения возбуждения генератора.

Схемы электронно-ионных регуляторов. Разработанный фирмой Westinghouse (США) электронно-ионный регулятор напряжения типа АТ [3] позволяет получить точность регулирования порядка $\pm 0,1\%$, скорость его действия превосходит скорость, достижимую с наилучшим регулятором электромагнитного типа.

Электронный регулятор напряжения типа АТ выполняется в двух модификациях. Одна из них (АТ) показана на рис. 4, другая (АТ-1) отличается от изображенной только измерительным элементом, схема которого приведена на том же рис. 4 (в пунктирном контуре).

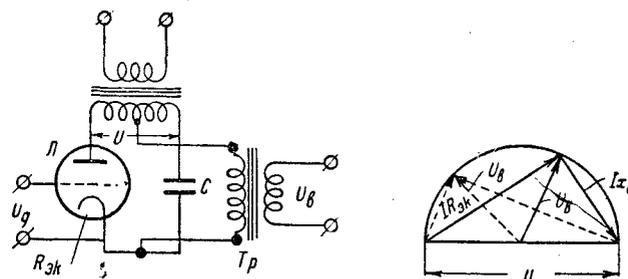


Рис. 3. Принципиальная схема усилительно-фазового моста

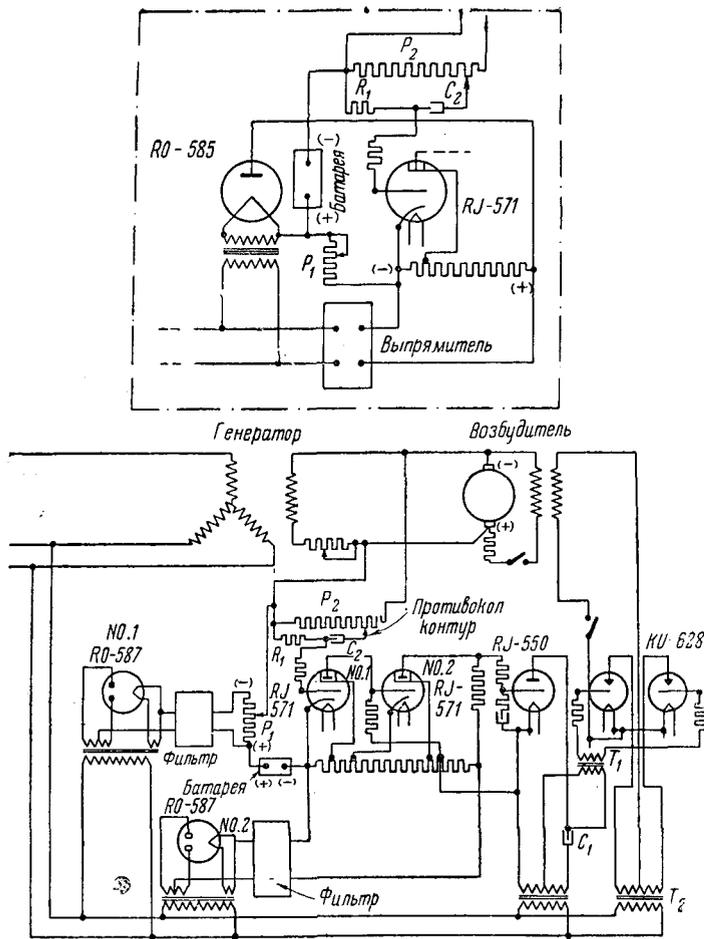


Рис. 4. Принципиальная схема электронно-ионного регулятора напряжения типа АТ фирмы Westinghouse

В измерительном элементе регулятора типа АТ используется двойной диод типа RO-587, среднее значение выпрямленного напряжения сравнивается с напряжением эталонной батареи и затем разность напряжений подается вместе с напряжением элемента обратной связи на усилительную часть регулятора. В измерительном элементе регулятора типа АТ-1 используется диод RO-585, работающий в режиме насыщения. Накал диода питается от регулируемого напряжения, поэтому ток насыщения диода резко изменяется с изменением этого напряжения. Анодная цепь диода питается от общего выпрямителя. Напряжение на реостате P_1 (рис. 4), определяемое током насыщения и, следовательно, зависящее от эффективного значения регулируемого напряжения, сравнивается с напряжением эталонной батареи и разность напряжений, как и в схеме АТ, вместе с напряжением элемента обратной связи подается на усилительную часть регулятора. Схема регулятора АТ имеет некоторое преимущество по сравнению со схемой АТ-1, в которой наблюдается запаздывание благодаря тепловой инерции нити накала. Фирма считает целесообразным применять регулятор АТ-1 в случаях изменения искажения кривой регулируемого напряжения и требования поддержания постоянства эффективного значения напряжения.

Элемент эластичной обратной связи состоит из емкости C_2 , сопротивления R_1 и установочного реостата P_2 . Усилительный элемент регулятора выполнен в виде двухлампового усилителя постоянного тока. Выход этого усилителя управляет фазо-

вым мостом, состоящим из лампы RJ-550 и емкости C_1 . Изменение напряжения на сетке лампы RJ-550 приводит к изменению фазы напряжения трансформатора T_1 , по отношению к фазе напряжения трансформатора T_2 , включенного в анодной цепи тиратронов КУ-628. Максимальный угол сдвига фаз может быть 110° .

Таким образом при изменении регулируемого напряжения изменяется среднее значение токов тиратронов, питающих дополнительную обмотку возбуждения возбудителя. Это изменение таково, что оно приводит к восстановлению напряжения генератора.

Существенным недостатком регуляторов типа АТ является использование в измерительном элементе эталонной батареи, от постоянства напряжения которой зависит точность регулирования. Использование в измерительном элементе мостовой схемы, не изменяя практически чувствительности измерительного элемента, устраняет необходимость в эталонной батарее и делает поэтому схему более надежной и стабильной.

Фирма Westinghouse выпускает наряду с точными также и упрощенный регулятор напряжения [4]. Измерительный элемент выполнен в виде моста, содержащего два параллельно включенных диода, работающих в режиме насыщения. Напряжение с диагонали моста, суммируясь с напряжением обратной связи, подается на сетки тиратронов T_3 и T_4 , питающих обмотку возбуждения возбудителя.

На рис. 5 показана схема электронного регулятора напряжения переменного тока [5], где в качестве измерительного элемента, в отличие от обычного, используется нелинейный феррорезонансный мост, имеющий характеристику, показанную на рис. 6.

Вольтамперная характеристика каждой из цепочек RLC контура, показанного на рис. 6, представлена на рис. 7. Изменяя соотношения между емкостью и данными насыщенного дросселя, можно смещать характеристику рис. 7 влево или вправо. Подбирая соответственно характеристики двух цепочек RLC, получают напряжение E_0 в диагонали моста, изменяющееся согласно, кривой, приведенной на рис. 6. Напряжение E_0 через фазовый мост управляет тиратроном T_3 . Тиратрон включен параллельно регулировочному реостату и «добавляет» ток в обмотку возбуждения генератора, которая питается также и от источника постоянного тока.

Преимуществами рассматриваемого регулятора являются сравнительная простота, большая чувст-

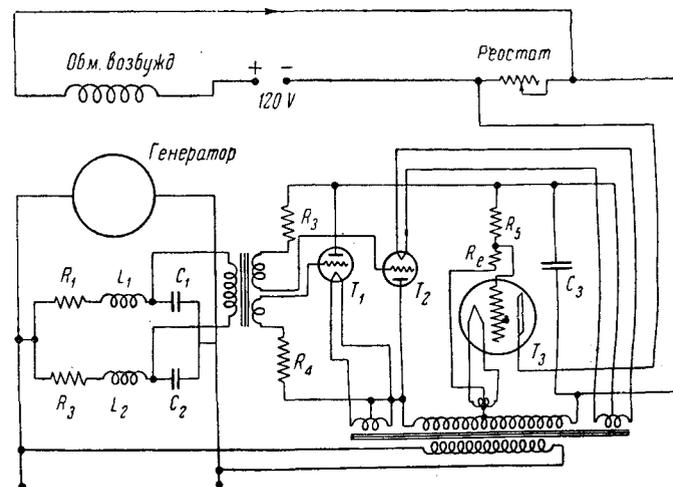


Рис. 5

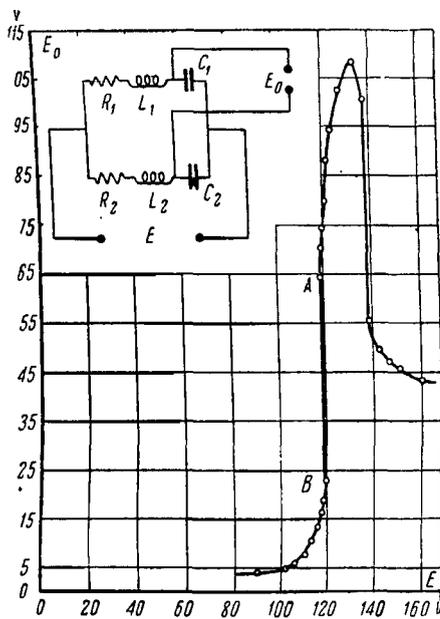


Рис. 6. Характеристика нелинейного моста ($R_1 = 78 \Omega$; $R_2 = 62 \Omega$; $C_1 = 27,4 \mu\text{F}$; $C_2 = 20 \mu\text{F}$; L_1 и L_2 — насыщенные дроссели)

вительность феррорезонансного моста, отсутствие эталонной батареи напряжения и элемента обратной связи. Работа без элемента обратной связи получилась удовлетворительной лишь благодаря специфичности схемы, а именно, ничтожно малому запаздыванию в измерительном элементе регулятора и работе выхода регулятора — тиратронов — непосредственно на возбуждение генератора. Недостатком регулятора следует считать зависимость регулируемого напряжения от частоты: изменение частоты на 1% влечет за собой изменение регулируемого напряжения на $1,3$ — $1,8\%$.

На рис. 8 показана принципиальная схема электронно-ионного регулятора напряжения типа EF фирмы Ward Leonard Electric Co. В качестве измерительного элемента использована лампа VT-4, работающая в насыщенном режиме. Напряжение на сопротивлении R-1, зависящее от регулируемого напряжения, управляет лампой VT-3, являющейся составной частью фазового мостика. Напряжение с диагонали фазового мостика подается на сеточный трансформатор, который управляет тиратроном VT-2 и тем самым воздействует на возбуждение возбудителя. В схеме вместо двух тиратронов используются один тиратрон и один газотрон. Это несколько упрощает схему, однако в ущерб надежности и гибкости ее. Регуляторы выпускаются фирмой в трех исполнениях — на 8; 12 и 20 А тока на выходе. Точность регулирования $\pm 2\%$. В случае неисправности в регуляторе он автоматически выключается и схема переходит на ручное управление.

На рис. 9 дана схема электронно-ионного регуля-

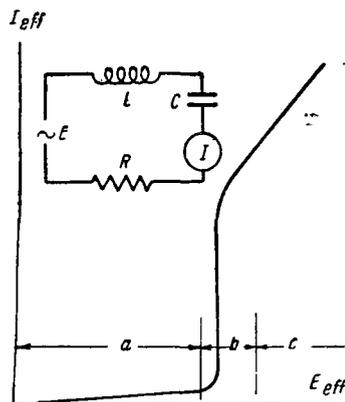


Рис. 7. Вольтамперная характеристика элемента нелинейного моста

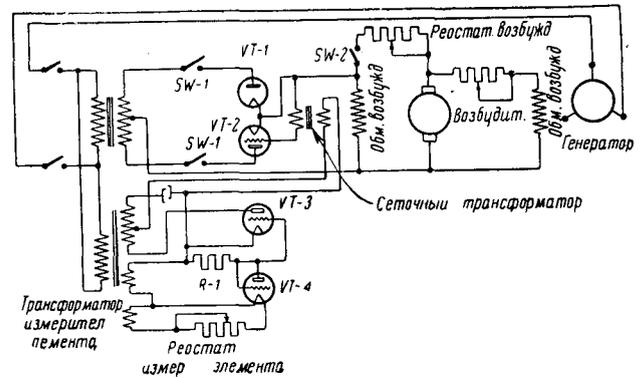


Рис. 8

тора напряжения, установленного на синхронном компенсаторе мощностью 15 000 кВА. Напряжения всех трех фаз выпрямляются и, суммируясь, подаются на тиритовый мостик, который, таким образом, реагирует на среднее значение регулируемого напряжения. Напряжение с диагонали моста, суммируясь с напряжением обратной связи (оно берется от напряжения возбудителя), подается на усилитель постоянного тока — однокаскадный усилитель с двумя параллельно включенными лампами.

Напряжение выхода усилителя подается вместе с переменным напряжением сеточного трансформатора на сетки трех тиратронов, которые включены параллельно обмотке возбуждения возбудителя. В зависимости от величины постоянной слагающей на сетке тиратронов изменяется среднее значение тока тиратронов. Точность работы такого регулятора $\pm 1\%$.

В 1930 г. на подстанции Говард (США) был установлен тиратронный регулятор напряжения на синхронном компенсаторе в 15 000 кВА [6]. Тиратроны типа¹ FG-29 в трехфазной схеме выпрямления питали последовательно с вспомогательным возбудителем обмотку возбуждения главного возбудителя. Вспомогательный возбудитель был включен навстречу к выходу тиратронов и, таким образом, давал возможность уменьшать остаточное напряжение главного возбудителя до нуля и тем самым создавать максимум отстающей реактивной мощности.

Измерительные элементы были выполнены в двух вариантах: один с заторможенным двигателем и сельсином и другой в виде моста с насыщенным

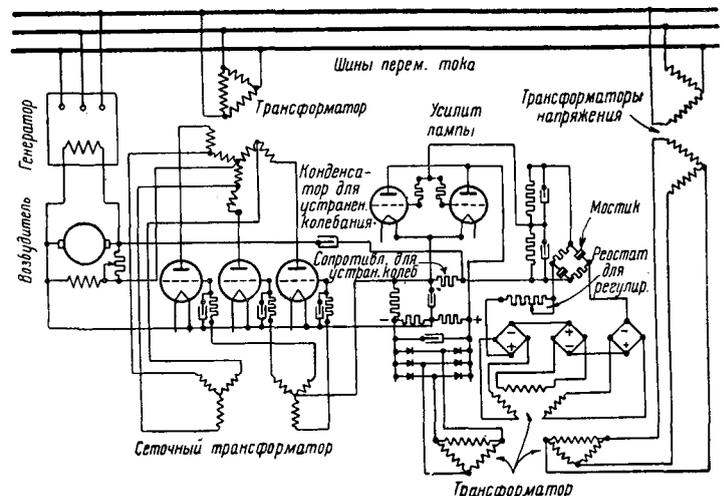


Рис. 9

¹ Данные тиратронов $I_{\max} = 75 \text{ A}$; $I_{cp} = 12,5 \text{ A}$, $U_{об} = 3,5 \text{ kV}$; $I_f = 17 \text{ A}$; $U_f = 5 \text{ V}$.

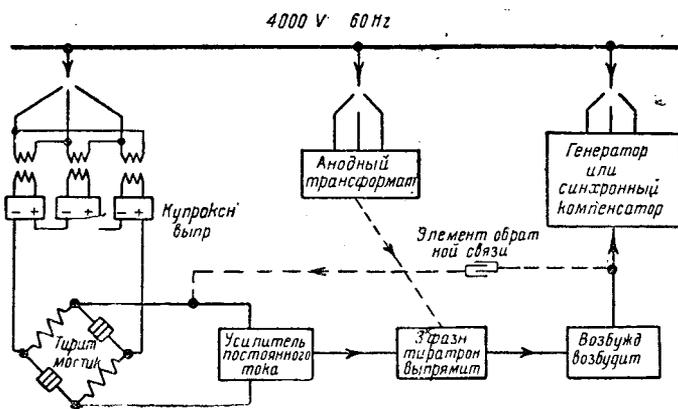


Рис. 10

дресселем, напряжение выхода которого, будучи усилено электронной лампой, управляет тиратронами FG-29. Первый вариант имел характеристики, подобные характеристикам электромеханических регуляторов; второй — большую точность и несколько быстрее реагировал на отклонения регулируемого напряжения.

В 1931 г. на станции Glenlyn (США) были установлены два тиратронных регулятора напряжения: один на генератор 20 000 kVA, другой на генераторе 25 000 kVA. Регуляторы были установлены для: 1) увеличения скорости восстановления напряжения после аварий и 2) улучшения условий устойчивости системы. Скелетная схема регуляторов приведена на рис. 10.

Три междуфазовых напряжения выпрямляются купроксными выпрямителями. Выпрямленное напряжение подается на тиритовый мостик. Напряжение диагонали мостика через усилитель постоянного тока управляет трехфазным тиратронным выпрямителем, питающим возбуждение возбудителя. Элемент обратной связи включен на напряжение возбудителя и его выход подается на усилитель вместе с напряжением диагонали моста. Статизм регулятора меньше 1,2%. При определенном значении возбуждения генератора реле времени включает сопротивление в цепь возбуждения возбудителя для защиты генератора от перегрузки и в то же время позволяет получить полное возбуждение при толчках нагрузки, длящихся 10 ÷ 25 sec.

Наличие пиковых нагрузок в небольших сетях резко изменяет напряжение в пределах, недопустимых для нормальных потребителей. В качестве примера следует указать на сварочные агрегаты, которые выполняются мощностью до 300 ÷ 500 kVA при $\cos \varphi = 0,3 \div 0,4$, и нагрузка которых может мгновенно меняться в пределах от нуля до номинальной.

Можно избрать два пути для уменьшения колебания напряжения при пиковых нагрузках: первый путь — это увеличение мощности генераторов и второй — установка быстродействующего регулятора напряжения. Увеличение мощности генераторов связано со значительными затратами, неиспользованием мощности генераторов по нагреву, а следовательно, с работой их не при оптимальном к. п. д. Как правило, второй путь дает более экономичные и качественно лучшие результаты.

На рис. 11 приведена схема быстродействующего ионного регулятора, предназначенного для регулирования напряжения генератора, питающего сварочный агрегат [7]. Принцип действия регулятора следующий.

Регулируемое напряжение от фаз RS подается на двухполупериодный выпрямитель (использованы сухие выпрямители). Выпрямленное напряжение сравнивается с напряжением, снимаемым с газоразрядного стабилизатора (glimmstrecken stabilisatoren). Разность между регулируемым напряжением и снимаемым от стабилизатора подается на сетку первого тиратрона. Увеличение регулируемого напряжения вызывает зажигание этого тиратрона, что в свою очередь, благодаря появлению напряжения на сопротивлении R (рис. 11), влечет за собой зажигание второго тиратрона. Конденсатор C, заряженный через выпрямитель и создававший до этого момента положительный потенциал на сетках выпрямителей S_1 и S_2 , после зажигания второго тиратрона будет разряжаться, и на сетках выпрямителей S_1 и S_2 появится отрицательный потенциал, подаваемый от постороннего источника [зажимы (+) и (-) на рис. 11]. В результате выпрямители S_1 и S_2 потухнут.

Уменьшение тока возбуждения генератора вызовет падение напряжения генератора. Это в свою очередь приведет к потуханию первого, а следовательно, и второго тиратрона и вызовет зажигание выпрямителей S_1 и S_2 . Напряжение на генераторе будет возрастать и процесс регулирования, описанный выше, повторится.

Подобный регулятор может быть уподоблен регулятору Тиррилла: в нем происходят чередующиеся включение и выключение обмотки возбуждения генератора. Среднее значение тока в обмотке будет зависеть от соотношения времени горения выпрямителей и их состояния потухания.

Постоянство характеристики зажигания первого тиратрона (разброс не больше + 0,1 V) обеспечивает стабилизацию регулируемого напряжения. Регулятор был установлен на генераторе 300 kVA с $X'_d = 12\%$. Напряжение при толчках нагрузки с $\cos \varphi = 0,4$ восстанавливалось с точностью 1—2% в течение 4 ÷ 5 периодов.

В схеме отношение ударного напряжения возбуждения к напряжению возбуждения при полной нагрузке было взято равным трем.

На рис. 12 показаны схемы электронного регулятора напряжения, предназначенного для регулирования постоянства силы тока 100-kVA электромагнита с точностью, большей чем 0,1% [8]. Изменения тока в обмотке обычно имеют место по двум причинам: 1) благодаря температурному изменению сопротивления обмотки, протекающему во времени медленно, и 2) в результате колебаний питающего

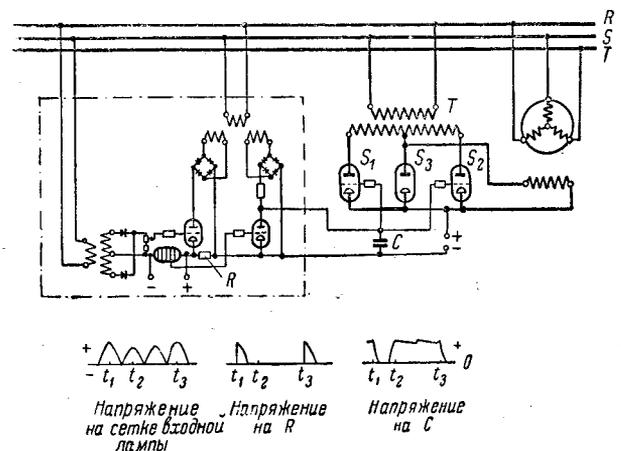


Рис. 11

нов обтекает обмотку возбуждения возбудителя, так как это показано на рис. 15.

При увеличении генераторного напряжения возрастает по абсолютному значению напряжение в диагонали измерительного моста, что приводит к запуску лампы L_3 усилительно-фазового элемента и тем самым к уменьшению среднего значения тока, текущего через тиратроны; возбуждение возбудителя падает, и напряжение генератора восстанавливается.

Электронно-ионный регулятор напряжения второго типа дает возможность изменять ток возбуждения в дополнительной обмотке возбудителя от $-i_{\text{max}}$ до $+i_{\text{max}}$. Отличается он от первого варианта дублированием усилительного и силового элемента. Схема применена для регулирования напряжения генератора 100 MVA. Элементы схемы те же, что и в предыдущей, за исключением тиратронов (для регулятора генератора 100 MVA взяты тиратроны ТГ-205).

Схема защиты регулятора предусматривает воздействие на цепь возбуждения основной обмотки возбуждения возбудителя таким образом, что после переходного процесса регулирования ток возбуждения в дополнительной обмотке устанавливается равным нулю. Это обеспечивает большую надежность работы генератора и исключает какие-либо изменения в его режиме при аварийном (автоматическом) отключении регулятора.

Обзор существующих типов электронно-ионных регуляторов напряжения показывает, что большинство из них использует в качестве стабилизирующего элемента эластичную обратную связь, вход которой включен на напряжение возбудителя, а выход вместе с выходом измерительного элемента подается на усилительно-силовой элемент регулятора.

Такая схема обеспечивает устойчивое регулирование при больших коэффициентах усиления — порядка 100—300. Однако она имеет тот существенный недостаток, что приводит к значительному

(в 10—20 раз) увеличению эквивалентной постоянной времени возбудителя и, следовательно, к уменьшению скорости регулирования в динамическом режиме. Электронно-ионный регулятор ВЭИ также использует в качестве стабилизирующего элемента эластичную обратную связь, вход которой включен на напряжение возбудителя, а выход — на усилительно-силовой элемент.

Регулятор напряжения ВЭИ, не обладая зоной нечувствительности, позволяет решать обе сформулированные выше задачи регулирования напряжения генераторов и увеличения статической устойчивости систем.

Литература

1. С. А. Лебедев. Анализ искусственной устойчивости генераторов. „Электричество“, стр. 31—37, № 4, 1938.
2. П. И. Сазанов. Экспериментальное исследование статической и искусственной устойчивости в электросистемах. „Электричество“, стр. 37—43, № 4, 1938.
3. F. H. Gulliksen. Electronic regulator for a—c generators. *El. Eng.*, стр. 807, № 6, 1934.
4. Гулликсен и Ведер. Промышленная электроника СНИИ, 1937.
5. C. Whipple. An electronic regulator for alternator. *El. Eng.*, стр. 6f3, № 6, 1935.
6. Sporn, Landon. Thyatron voltage regulators. *El. World*, стр. 28, May 1935.
7. C. Fröhmer. Röhrenstrassregler für Wechselstromgeneratoren bei Stossbelastung. *VDE Vach berichte*, стр. 153, 1937.
8. H. Anderson. Regulator systems for electromagnets. *R. S. J.*, стр. 497, Dec. 1937.
9. T. Reid, F. Marris. Regulator maintains voltage for matian picture printers. *Electronics*, стр. 39, Dec. 1937.
10. Воскресенский И. Тиратронный регулятор напряжения. „Известия электропромышленности слабого тока“, стр. 44—47, № 5—6, 1937.
11. Л. С. Гольдфарб и Г. Р. Герценберг. Электронно-ионный регулятор напряжения для машин переменного тока. Отчет ВЭИ.
12. Г. Р. Герценберг. Описание электронно-ионного регулятора напряжения для генераторов переменного тока. Отчет ВЭИ.
13. Г. Р. Герценберг. Техническая помощь в собирании и систематизации эксплуатационного опыта по электронным регуляторам напряжения. Отчет ВЭИ.

Основные проблемы электрических машин прямолинейного движения

Канд. техн. наук, доц. А. И. МОСКВИТИН

Всесоюзный электротехнический институт

Во многих промышленных приводах рабочий орган совершает прямолинейно-возвратное движение. Таковы, например, значительная часть приводов в горнодобывающем и горнообогатительном деле (молотки, перфораторы, качающиеся конвейеры, грохота, навалочные машины и т. п.), многие ручные инструменты и стационарные машины, используемые в железнодорожном деле, металлообрабатывающей, строительной, деревообрабатывающей и легкой промышленности (всякого рода молотки — для обрубки, клепки, трамбовки и облицовочных работ, для забивки костылей и забивки баласта под шпалы и др., сотрясательно-формовочные и прессово-формовочные машины, ткацкие станки и обувные машины), весьма большое число приводов телеуправления и автоматики (привод масляных вы-

ключателей, тормозные электромагниты, электромагниты телеуправления, в том числе многочисленные приводы оборонной промышленности).

Как видим, в этих приводах заинтересованы все отрасли промышленности от тяжелой и оборонной до самых различных отраслей легкой промышленности. Почти все эти приводы электрифицированы или электрифицируются. Естественно, что при электрификации их необходимо найти наиболее целесообразное решение.

В мировой технике известны два принципиально различных решения для подобных приводов. Первое решение — электромеханический привод, т. е. нормальный электрический двигатель с той или иной механической передачей для преобразования вращательного движения в возвратно-поступатель-

ное и для снижения числа ходов по сравнению с числом оборотов двигателя. Второе решение — соленоидный привод, или, в более общей формулировке, привод с электрической машиной прямолинейного движения. И то и другое решение имеют свои преимущества и недостатки.

Основное преимущество электромеханического привода состоит в том, что нормальные электрические машины хорошо изучены, работают безотказно, имеют хорошие рабочие характеристики и налажен их массовый выпуск. Недостаток этого привода — сложность механической передачи, большой добавочный вес и дороговизна всей машины в целом и, в большинстве случаев, — большие потери энергии в передаче, что в значительной степени обесценивает преимущество нормальной машины в отношении к. п. д.

Основное преимущество соленоидного привода — простота, отсутствие всякой механической передачи, компактность, и в значительном числе случаев, выигрыш в весе, стоимости и габаритах всего агрегата.

Несмотря на всю заманчивость второго решения, оно имеет и некоторые недостатки. Считают, например, что соленоид по сравнению с нормальной электрической машиной имеет более низкие рабочие характеристики (к. п. д. и $\cos \varphi$) и часто требует большего расхода активных материалов — меди и железа, чем нормальная машина. Однако, насколько можно судить, наблюдая борьбу за внедрение соленоидного привода в промышленность, его технические характеристики не являются основным препятствием к его широкому распространению. На наш взгляд, главная трудность — это недостаточная изученность соленоида, как электрической машины.

Действительно, при разработке такого привода часто приходится начинать с самых «азов» — установления принципа действия, в котором не всегда можно быть уверенным. Совершенно неизвестны основные характеристики как к. п. д. и $\cos \varphi$, и данные по расходу активного материала, т. е. все основные величины, которые для нормальных машин имеются в любом учебнике. Относительно характеристик соленоида существуют самые противоречивые мнения, как оптимистические, так и пессимистические. Например, Романовский [1] экспериментально доказал, что к. п. д. соленоидного привода чрезвычайно низок — порядка 8—11%.

Schüler [2], наоборот, показывает, что к. п. д. его может быть почти того же порядка, что и нормальных вращающихся машин (около 60%). Для коэффициента мощности в литературе приводятся самые разнообразные цифры — от 5% до 1. Такая же неопределенность существует и по вопросу об использовании материала.

Ввиду такой слабой изученности вопроса чрезвычайно желательно, чтобы многочисленные организации и лица, работающие по соленоидному приводу, поделились своими соображениями и опытом по основным вопросам теории расчета, конструкции и исследования электрических машин прямолинейного движения, чтобы это многообещающее решение, дающее наиболее тесное сращивание машины-двигателя с машиной-орудием, получило бы быстрое широкое техническое применение в народном хозяйстве.

В частности, автор хотел бы на страницах этого журнала сообщить о некоторых результатах своих

работ по основным вопросам теории этих машин, возникших, главным образом, при участии в практической разработке соленоидных приводов в различных областях промышленности.

В данной работе хотелось бы высказать несколько соображений по поводу одного из наиболее неясных вопросов соленоидного привода — о к. п. д.

Коэффициент полезного действия соленоидного привода. Вопрос о к. п. д. соленоида наиболее важен с точки зрения нагрева машины. Полезная мощность машины

$$P = \Delta P \left(\frac{\eta}{1 - \eta} \right),$$

где η — к. п. д. и ΔP — потери.

При одинаковом нагреве (при одинаковых потерях ΔP) полезная мощность, как видно, сильно возрастает одновременно с к. п. д. Например, при $\eta = 60\%$ полезная мощность в 13,5 больше, чем при $\eta = 10\%$.

Другая сторона вопроса к. п. д., — не менее важная при мощных приводах, — экономия энергии.

Некоторое представление о к. п. д. соленоида с качественной стороны легче всего получить, если воспользоваться аналогией с вращающимися машинами. Для количественной его оценки необходимо рассмотреть несколько подробней явления, происходящие в соленоиде при нестационарных процессах, т. е. при движущемся сердечнике.

Электрический к. п. д. вращающейся машины, как известно, зависит от величины противо-э. д. с. якоря ($\eta_{э.л} = \frac{E}{U}$). Сама же противо-э. д. с. прямо пропорциональна скорости якоря. Очевидно, для получения высокого к. п. д. соленоида надо стремиться к повышению скорости движения сердечника (основное условие для этого — уменьшение массы сердечника и всех жестко сцепленных с ним частей). При соответствующих скоростях, по видимому, к. п. д. должен быть принципиально не ниже, чем для вращающейся машины, во всяком случае выше значения, указанного Романовским [1].

Приведенную аналогию с вращающимися машинами, конечно, не надо понимать как простой механический перенос законов вращающихся машин на соленоиды, надо всегда учитывать и некоторые особенности соленоида.

В частности, можно было бы, например, просто считать соленоид машиной в режиме пуска. В этом случае, как известно [3], электрический к. п. д. машины всегда остается постоянным и равным 50% (половина энергии, забираемой из сети, идет на создание кинетической энергии якоря и преодоление нагрузочного момента, а другая половина — тратится в виде джоулевых потерь). При этом становятся неправдоподобными величины к. п. д. 10% и 60% [1, 2]. Однако при таком представлении не учтены две особенности соленоида.

Во-первых, сердечник имеет конечную величину хода; поэтому, в отличие от вращающейся машины, скорость сердечника в конце пускового периода может быть гораздо ниже скорости холостого хода и соответственно ниже может быть противо-э. д. с. в обмотке. Отсюда выясняется реальность порядка величины к. п. д. 10%, названной Романовским [1].

Во-вторых, в машинах обычно не учитывается противо-э. д. с. самоиндукции и принимается, что

при неподвижном якоре противо-э. д. с. равна нулю. Это практически вполне правильно при относительно малой индуктивности якоря и большом времени пуска вращающихся машин. Но в случае соленоида, при большой индуктивности и малом времени его пуска, противо-э. д. с. при неподвижном сердечнике равна не нулю, а полному напряжению сети. Соответствующая этому напряжению и току магнитная энергия соленоида в процессе дальнейшего притяжения сердечника почти полностью (в рациональных конструкциях) превращается в механическую работу притяжения сердечника, т. е. является полезной. Отсюда становится понятной реальность второй цифры к. п. д. — 60%, указанной Schüller.

Для количественного определения к. п. д. надо знать кривую тока в обмотке соленоида за время притяжения сердечника, а также механическую работу сердечника (кинетическую энергию в конце хода и работу на преодоление сопротивлений). Результаты экспериментального определения этих величин приведены в нашей литературе [1]. К сожалению, это исследование было проведено только для частного случая (движение сердечника, нагруженного большой массой), и величина к. п. д. оказалась низкой.

Аналитическое определение тока соленоида и движения сердечника выполнено до сих пор только для случая очень малых скоростей и малых изменений тока [4], не представляющего большого практического интереса. В общем виде дифференциальные уравнения движения и тока неразрешимы. Для практических целей более пригоден метод расчета по точкам, предложенный Schüller [2].

К сожалению, при разработке своего метода автор определяет усилие притяжения по формуле Максвелла, которая, как известно, справедлива только при движении якоря по направлению силовых линий и только при небольших воздушных зазорах. Поэтому мы несколько видоизменили этот метод.

Вкратце, сущность метода состоит в том, что все исследуемое время разбивается на ряд малых промежутков Δt и для каждого из этих промежутков определяется ряд величин.

1. Находят среднюю противо-э. д. с. соленоида, обусловленную изменением магнитного потока,

$$e = U - iR,$$

где i — средний ток за время Δt . Для первой точки предварительно принимают $iR \approx 0$, а для остальных — определяют падение напряжения предварительной экстраполяцией кривой i до середины Δt .

2. По найденному e определяют приращение потока за время Δt и индукцию в зазоре B_2 в конце этого отрезка времени:

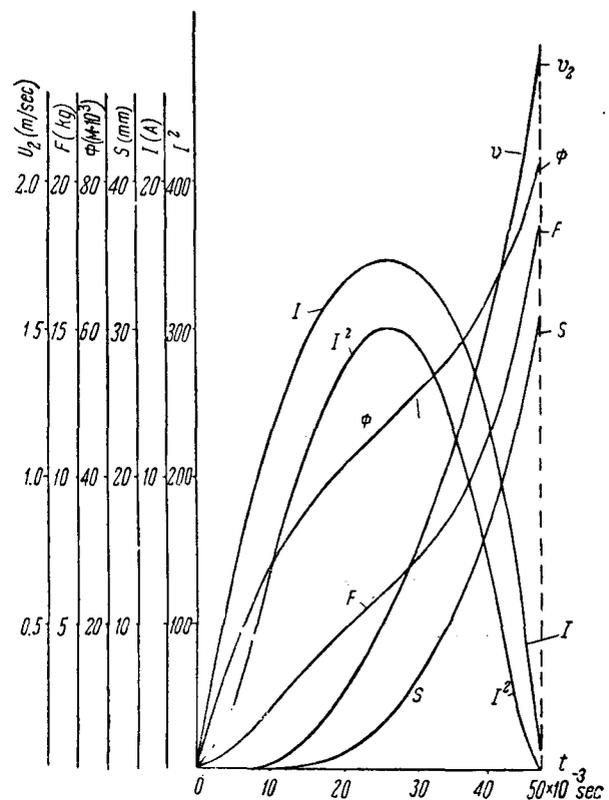
$$\Phi_2 - \Phi_1 = \frac{e \Delta t \cdot 10^8}{w},$$

где w — число витков соленоида,

$$B_2 = \frac{e \Delta t \cdot 10^8}{wq} + B_1,$$

где q — сечение воздушного зазора, B_1 — индукция в начале интервала Δt .

3. Зная B_2 , находят силу втягивания F_2 (в kg) в



Подсчет к. п. д. соленоида (напряжение сети $U = 15$ V; ход сердечника $S = 3$ см, вес сердечника $G = 1$ kg)

конце Δt и среднюю силу за Δt

$$F_2 \approx \left(\frac{B_2}{5000} \right)^2 q; \quad F = \frac{F_1 + F_2}{2}.$$

4. Затем отыскивают приращение скорости Δv при весе (в kg) сердечника G , среднюю скорость v и приращение пути Δs :

$$\Delta v = \frac{9,81 \cdot (F - G) \Delta t}{G},$$

$$v_2 = v_1 + \Delta v, \quad v = \frac{v_1 + v_2}{2}, \quad \Delta s = v \Delta t.$$

5. В заключение определяют положение бойка в конце Δt , соответствующую величину воздушного зазора δ_2 , и по зазору и индукции — необходимые ампервитки воздушного зазора; затем, прибавляя ампервитки железа и находят ток i_2 в конце Δt :

$$\delta_2 = \delta_1 - \Delta s, \\ i_2 = \frac{AW_2 + AW_{жс}}{w}.$$

Для случая движения сердечника *поперек поля*, а также и при больших зазорах (когда неприменима формула Максвелла), мы (в качестве первого приближения)¹ видоизменяем этот метод таким образом, что сначала подсчитываем кривые магнитной проводимости в зависимости от положения бойка, $\Lambda = f(x)$, и производную от проводимости по пути, $\frac{d\Lambda}{dx} = \varphi(x)$, и определяем силу втягивания по формуле:

$$F_2 = 0,51 \frac{\Phi^2 d\Lambda}{\Lambda^2 dx}.$$

¹ При желательности более точных подсчетов, необходимо определять приращение кинетической энергии бойка графическим методом по характеристикам намагничивания электромагнита, однако этот метод сложнее, почему мы здесь его не излагаем.

Подсчет ампервитков зазора выполняется по формуле:

$$AW = \frac{\Phi}{\Lambda}$$

В остальном расчет не отличается от вышеизложенного.

Указанным методом были подсчитаны² динамические характеристики электромагнита (рисунок) при различных режимах, чтобы исследовать влияние на к. п. д. следующих факторов: нагрузки сердечника большой массой, нагрузки противодействующим усилием и изменения напряжения сети.

Полезной считалась кинетическая энергия сердечника (включая и сцепленную с ним массу) и работа, идущая на преодоление противодействующих усилий (включая собственный вес сердечника).

Учитывались³ потери в меди $P_c = \int_0^T i^2 R dt$ и энергия магнитного поля в конце хода сердечника $P_m =$

$= \int_0^{\Phi_m} i w d\Phi$ (оба вида потерь определялись графическим интегрированием).

В таблице приведены результаты подсчетов к. п. д., времени притяжения и величины $\varepsilon = \frac{I_{эфф}}{I_{ст}}$,

где $I_{эфф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i^2 dt}$ — эффективный ток электромагнита за время притяжения сердечника T , подсчитанный графическим интегрированием, $I_{ст}$ — ток электромагнита при данном напряжении U клемм и при неподвижном сердечнике $I_{ст} = \frac{U}{R}$.

Таким образом величина $\varepsilon = \frac{I_{эфф}}{I_{ст}}$ показывает, в какой мере процесс приближается к установившемуся. Выводы из этой таблицы, представляющие большой интерес, мы сформулируем в заключении.

В дополнение к данным этой таблицы можем указать, что и по ряду других расчетов к. п. д. электромагнита имеет примерно те же значения. Так например, электромагнит пресса для сухого прессования кирпичей на 90 t максимального усилия имеет, согласно расчету, проведенному доц. Лысовым, к. п. д. около 55%.

² Подсчеты производил инж. Б. П. Лукьянов.

³ Сердечник и магнитопровод были выполнены из раскисленного железа и потери в них не учитывались.

	Напряжение V	К. п. д. %	Время втягивания $T \times 10^{-3}$ sec	$\varepsilon = \frac{I_{эфф}}{I_{ст}}$
Влияние напряжения сети при свободно двигающемся сердечнике (нагрузка сердечника только собственным весом)	120	63	12,3	0,248
	60	57	18	0,318
	40	54	23,6	0,395
Боек преодолевает противодействующее усилие 49 kg	15	37	47	0,578
Боек жестко сцеплен с грузом 49 kg, двигающемся горизонтально	120	53	15,5	0,343
	120	9,6	49,2	0,84

Выводы. 1. К. п. д. соленоидного привода может быть достаточно высоким (до 60—65%).

2. К. п. д. тем ниже, чем больше ток соленоидной обмотки, чем больше величина, т. е. чем меньше противо-э. д. с. обмотки и чем ниже скорость сердечника.

3. Напряжение сети влияет на к. п. д. благодаря непропорциональному уменьшению скорости сердечника. При соответствующем расчете можно получить высокий к. п. д. и при низком напряжении.

4. Сильней всего снижается к. п. д. от замедляющего действия больших масс, связанных с сердечником; этим и объясняется низкая величина к. п. д. привода масляников, экспериментально определенная Романовским. Влияние таких грузов гораздо сильнее, чем влияние противодействующего усилия той же величины. Целесообразно в некоторых случаях для уменьшения размеров соленоидной обмотки соединять ускоряемые массы с сердечником не жестко, а при помощи пружины (сердечник в конце хода закрепляется защелкой).

Литература

1. В. П. Романовский. О работе соленоидов. Сборник „Высоковольтное аппаратостроение“, ОНТИ, 1935.
2. Schüler, Die Wirkungsgrad des Elektromagneten. ETZ, стр. 611, 652, 1913.
3. Р. Л. Аронин. Электрооборудование промышленных приводов, стр. 125, Укр. ОНТИ, 1936.
4. Э. Яссе. Электромагниты. Госэнергоиздат, 1934.
5. А. Я. Буйлов. Сила тяги электромагнита. „Вестник электропромышленности“ № 5, 1935.

К преобразованию цепей переменного тока, содержащих взаимную индуктивность и э. д. с.

Инж. И. М. РАЙКС

Рига

В этой статье рассматривается установившийся режим электрических цепей переменного тока постоянной частоты. Показывается, как найти для части сложной цепи эквивалентную схему замещения более простой формы и не содержащую внутренней связи, т. е. взаимно-индуктивной связи своих ветвей. Преобразуемый участок цепи может иметь индуктивную связь с ветвями остальной — внешней цепи, которые в дальнейшем будем называть ветвями внешней связи. Для того чтобы ток и напряжение ветвей внешней связи не изменялись, в них, как увидим ниже, при замещении цепей необходимо ввести добавочные сопротивления и э. д. с.

Перейдем к отдельным случаям эквивалентных цепей.

1. Последовательное соединение n ветвей с внутренней и внешней связью — система AB (рис. 1, a). Ветви $A'B'$ и $A''B''$ пусть будут ветви внешней связи для замещаемой цепи AB . Принимаем обозначения:

$Z_{kk} = r_{kk} + jx_{kk} = \frac{1}{Y_{kk}}$ — кажущееся сопротивление участка k последовательных ветвей;

$Z_{km} = Z_{mk}$ — сопротивление взаимной связи ветвей k и m ;

Z'_k, Z''_k — сопротивления связи ветви k с внешними ветвями $A'B'$ и $A''B''$;

\dot{E}_k — э. д. с. ветви k ;

I — ток последовательных ветвей AB ;

i', i'' — токи ветвей внешней связи $A'B'$ и $A''B''$;

\dot{U} — напряжение между зажимами A и B .

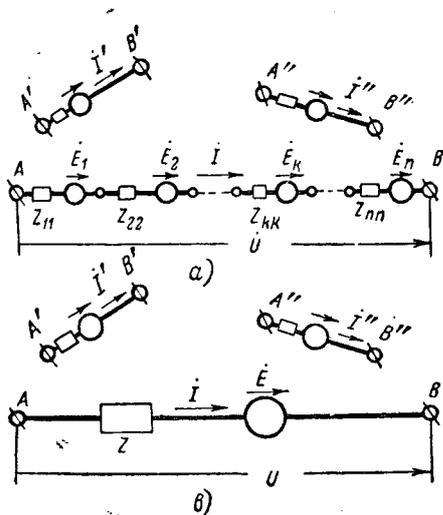


Рис. 1

Для системы последовательных ветвей можем написать уравнение:

$$\dot{U} = i \sum_{k=1}^{k=n} \sum_{m=1}^{m=n} Z_{km} - \sum_{k=1}^{k=n} \dot{E}_k + i' \sum_{k=1}^{k=n} Z'_k + i'' \sum_{k=1}^{k=n} Z''_k.$$

Для эквивалентной упрощенной цепи (рис. 1, b) имеем уравнение:

$$\dot{U} = iZ - \dot{E} + i'Z' + i''Z''.$$

Исключая из уравнений напряжение \dot{U} , получаем:

$$i \left(Z - \sum_{k=1}^{k=n} \sum_{m=1}^{m=n} Z_{km} \right) - \left(\dot{E} - \sum_{k=1}^{k=n} \dot{E}_k \right) + i' \left(Z' - \sum_{k=1}^{k=n} Z'_k \right) + i'' \left(Z'' - \sum_{k=1}^{k=n} Z''_k \right) = 0.$$

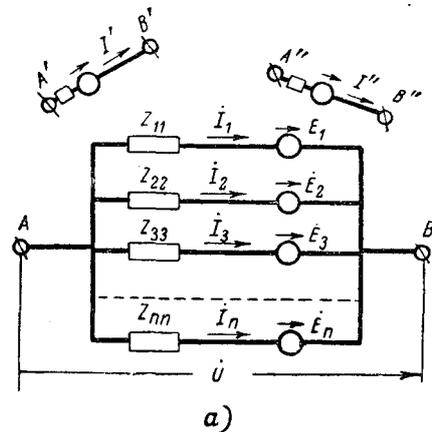


Рис. 2

Замещаемые цепи должны быть эквивалентными при любых внешних цепях. Поэтому токи i, i' и i'' являются независимыми величинами, могущими принять произвольные значения. Приравняв нулю коэффициенты при независимых величинах

Последнее уравнение действительно при любых значениях напряжения \dot{U} и токов i' и i'' . Объединяя коэффициенты при независимых величинах \dot{U} , i' , i'' и свободный член этого уравнения, находим:

$$Y = \frac{1}{Z} = -\frac{1}{D_2} \begin{vmatrix} Z_{11}Z_{12}\dots Z_{1k}\dots Z_{1n} & 1 \\ Z_{21}Z_{22}\dots Z_{2k}\dots Z_{2n} & 1 \\ \dots & \dots \\ Z_{k1}Z_{k2}\dots Z_{kk}\dots Z_{kn} & 1 \\ \dots & \dots \\ Z_{n1}Z_{n2}\dots Z_{nk}\dots Z_{nn} & 1 \\ 1 & 1 \dots 1 \dots 1 & 0 \end{vmatrix} \quad (2a)$$

$$\dot{E} = -\frac{Z}{D_2} \begin{vmatrix} Z_{11}Z_{12}\dots Z_{1k}\dots Z_{1n} & \dot{E}_1 \\ Z_{21}Z_{22}\dots Z_{2k}\dots Z_{2n} & \dot{E}_2 \\ \dots & \dots \\ Z_{k1}Z_{k2}\dots Z_{kk}\dots Z_{kn} & \dot{E}_k \\ \dots & \dots \\ Z_{n1}Z_{n2}\dots Z_{nk}\dots Z_{nn} & \dot{E}_n \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad (2b)$$

$$Z' = -\frac{Z}{D_2} \begin{vmatrix} Z_{11}Z_{12}\dots Z_{1k}\dots Z_{1n} & Z'_1 \\ Z_{21}Z_{22}\dots Z_{2k}\dots Z_{2n} & Z'_2 \\ \dots & \dots \\ Z_{k1}Z_{k2}\dots Z_{kk}\dots Z_{kn} & Z'_k \\ \dots & \dots \\ Z_{n1}Z_{n2}\dots Z_{nk}\dots Z_{nn} & Z'_n \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad (2c)$$

$$Z' \cdot \frac{\dot{U} + \dot{E} - i'Z' - i''Z''}{Z} + i'Z'_0 + i''Z''_0 - \dot{E}_0 = \frac{1}{D_2}$$

Объединяя члены с \dot{U} , i' , i'' и свободный член последнего уравнения и приравнявая нулю полученные коэффициенты, находим:

$$\dot{E}'_0 = \frac{\dot{E}}{Z} Z' + \frac{1}{D_2} \begin{vmatrix} Z_{11}Z_{12}\dots Z_{1k}\dots Z_{1n} & \dot{E}_1 \\ Z_{21}Z_{22}\dots Z_{2k}\dots Z_{2n} & \dot{E}_2 \\ \dots & \dots \\ Z_{k1}Z_{k2}\dots Z_{kk}\dots Z_{kn} & \dot{E}_k \\ \dots & \dots \\ Z_{n1}Z_{n2}\dots Z_{nk}\dots Z_{nn} & \dot{E}_n \\ Z'_1 Z'_2 \dots Z'_k \dots Z'_n & 0 \end{vmatrix} \quad (2d)$$

$$Z'_0 = \frac{Z'^2}{Z} + \frac{1}{D_2} \begin{vmatrix} Z_{11}Z_{12}\dots Z_{1k}\dots Z_{1n} & Z'_1 \\ Z_{21}Z_{22}\dots Z_{2k}\dots Z_{2n} & Z'_2 \\ \dots & \dots \\ Z_{k1}Z_{k2}\dots Z_{kk}\dots Z_{kn} & Z'_k \\ \dots & \dots \\ Z_{n1}Z_{n2}\dots Z_{nk}\dots Z_{nn} & Z'_n \\ Z'_1 Z'_2 \dots Z'_k \dots Z'_n & 0 \end{vmatrix} \quad (2e)$$

$$Z''_0 = \frac{Z'Z''}{Z} + \frac{1}{D_2} \begin{vmatrix} Z_{11}Z_{12}\dots Z_{1k}\dots Z_{1n} & Z''_1 \\ Z_{21}Z_{22}\dots Z_{2k}\dots Z_{2n} & Z''_2 \\ \dots & \dots \\ Z_{k1}Z_{k2}\dots Z_{kk}\dots Z_{kn} & Z''_k \\ \dots & \dots \\ Z_{n1}Z_{n2}\dots Z_{nk}\dots Z_{nn} & Z''_n \\ Z'_1 Z'_2 \dots Z'_k \dots Z'_n & 0 \end{vmatrix}$$

$$Z'' = -\frac{Z}{D_2} \begin{vmatrix} Z_{11}Z_{12}\dots Z_{1k}\dots Z_{1n} & Z''_1 \\ Z_{21}Z_{22}\dots Z_{2k}\dots Z_{2n} & Z''_2 \\ \dots & \dots \\ Z_{k1}Z_{k2}\dots Z_{kk}\dots Z_{kn} & Z''_k \\ \dots & \dots \\ Z_{n1}Z_{n2}\dots Z_{nk}\dots Z_{nn} & Z''_n \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad (2c)$$

Обратимся к изменениям в ветвях внешней связи $A'B'$ и $A''B''$.

Принимаем, что ветви при преобразовании получают добавочные э. д. с. \dot{E}'_0 и \dot{E}''_0 , добавочные сопротивления Z'_0 и Z''_0 и взаимную связь Z''_0 . Имеем для ветви $A'B'$:

$$iZ' + i'Z'_0 + i''Z''_0 - \dot{E}'_0 = \sum_{k=1}^{k=n} i_k Z'_k$$

Подставив найденные выше значения для токов i и i_k , имеем:

$$\begin{vmatrix} Z_{11}Z_{12}\dots Z_{1k}\dots Z_{1n} & (-\dot{U} - \dot{E}'_1 + i'Z'_1 + i''Z''_1) \\ Z_{21}Z_{22}\dots Z_{2k}\dots Z_{2n} & (-\dot{U} - \dot{E}'_2 + i'Z'_2 + i''Z''_2) \\ \dots & \dots \\ Z_{k1}Z_{k2}\dots Z_{kk}\dots Z_{kn} & (-\dot{U} - \dot{E}'_k + i'Z'_k + i''Z''_k) \\ \dots & \dots \\ Z_{n1}Z_{n2}\dots Z_{nk}\dots Z_{nn} & (-\dot{U} - \dot{E}'_n + i'Z'_n + i''Z''_n) \\ Z'_1 Z'_2 \dots Z'_k \dots Z'_n & 0 \end{vmatrix}$$

Подобные выражения получим и для $\dot{E}''_0 Z''_0$ и Z''_0 , причем $Z''_0 = Z''_0$.

Пример. Для $n=3$ параллельных ветвей без взаимной индукции и без внешней связи имеем по уравнениям (2a) и (2b):

$$D_2 = \begin{vmatrix} Z_{11} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{33} \end{vmatrix} = Z_{11}Z_{22}Z_{33}$$

$$Y = \frac{1}{Z} = -\frac{1}{D_2} \begin{vmatrix} Z_{11} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & Z_{22} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & Z_{33} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \frac{1}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{22}} + \frac{1}{Z_{33}}$$

$$\dot{E} = -\frac{Z}{D_2} \begin{vmatrix} Z_{11} & 0 & 0 & \dot{E}_1 \\ 0 & Z_{22} & 0 & \dot{E}_2 \\ 0 & 0 & Z_{33} & \dot{E}_3 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = Z \left(\frac{\dot{E}_1}{Z_{11}} + \frac{\dot{E}_2}{Z_{22}} + \frac{\dot{E}_3}{Z_{33}} \right)$$

Для общего случая параллельных ветвей без внутренней связи уравнения (2a) — (2e) принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} Y &= \sum_{k=1}^{k=n} Y_k \\ \dot{E} &= \frac{1}{Y} \sum_{k=1}^{k=n} \dot{E}_k Y_k \end{aligned} \right\} \quad (2f)$$

$$\left. \begin{aligned} Z' &= \frac{1}{Y} \sum_{k=1}^{k=n} Z'_k Y_k \\ \dot{E}'_0 &= YZ' \dot{E} - \sum_{k=1}^{k=n} Y_k Z'_k E'_k \\ Z''_0 &= YZ'' - \sum_{k=1}^{k=n} Y_k Z''_k \\ \dot{Z}''_0 &= YZ' Z'' - \sum_{k=1}^{k=n} Y_k Z'_k Z''_k \end{aligned} \right\} (2f)$$

где $Y_k = \frac{1}{Z}$ представляет собою проводимость ветви k .

3. Многоугольник с внутренней и внешней связью (рис. 3).
Принимаем для исходного многоугольника с n узлами следующие обозначения:

Z_{km} — кажущееся сопротивление ветви, примыкающей к узлам k и m ; $Z_{12} = Z_{12} = Z_{km}$ — сопротивление связи ветвей km и $l-2$; Z'_{km} — сопротивление связи ветвей km и $A'B'$;

\dot{E}_{km} — э. д. с. ветви km ; i_{km} — ток ветви km .

Пишем уравнения для $\frac{n(n-1)}{2}$ ветвей многоугольника:

$$\left. \begin{aligned} i_{12} Z_{12} + i_{13} Z_{13} + i_{14} Z_{14} + \dots + i_{1k} Z_{1k} + \dots + i_{1n} Z_{1n} + i_{23} Z_{23} + i_{24} Z_{24} + \dots + i_{(n-1)n} Z_{(n-1)n} - \dot{U}_{12} - \dot{E}'_{12} + i' Z'_{12} + i'' Z''_{12} &= 0 \\ i_{13} Z_{13} + i_{14} Z_{14} + \dots + i_{1k} Z_{1k} + \dots + i_{1n} Z_{1n} + i_{23} Z_{23} + i_{24} Z_{24} + \dots + i_{(n-1)n} Z_{(n-1)n} - \dot{U}_{13} - \dot{E}'_{13} + i' Z'_{13} + i'' Z''_{13} &= 0 \\ \dots &\dots \\ i_{12} Z_{12} + i_{13} Z_{13} + i_{14} Z_{14} + \dots + i_{1k} Z_{1k} + \dots + i_{1n} Z_{1n} + i_{23} Z_{23} + i_{24} Z_{24} + \dots + i_{(n-1)n} Z_{(n-1)n} - \dot{U}_{km} - \dot{E}'_{km} + i' Z'_{km} + i'' Z''_{km} &= 0 \\ \dots &\dots \\ i_{12} Z_{12} + i_{13} Z_{13} + i_{14} Z_{14} + \dots + i_{1k} Z_{1k} + \dots + i_{1n} Z_{1n} + i_{23} Z_{23} + i_{24} Z_{24} + \dots + \\ &+ i_{(n-1)n} Z_{(n-1)n} - \dot{U}_{(n-1)n} - \dot{E}'_{(n-1)n} + i' Z'_{(n-1)n} + i'' Z''_{(n-1)n} = 0 \end{aligned} \right\} (3a)$$

Из этих уравнений можем выразить токи ветвей многоугольника при помощи определителя, подобно тому, как мы это сделали для случая 2.

Для схемы эквивалентного многоугольника обозначаем:

Y_{km} — проводимость ветви km ; \dot{E}_{km} и i_{km} — э. д. с. и ток этой ветви; Z'_{km} и Z''_{km} — соответственно сопротивления взаимной связи ветвей km , $A'B'$ и km , $A''B''$.

Для ветви km :

$$i_{km} = (\dot{U}_{km} + \dot{E}_{km} - i' Z'_{km} - i'' Z''_{km}) Y_{km}. \quad (3b)$$

Для узловых точек эквивалентных многоугольников можем написать $(n-1)$ независимых уравнений, подобных следующему, составленному для узла l :

$$\sum_{k=2}^{k=n} i_{lk} = \sum_{k=2}^{k=n} i_{lk}.$$

Подставляем значение токов i_{lk} и i_{lk} из уравнений (3a) и (3b). При этом выражаем напряжения ветвей согласно формуле:

$$\dot{U}_{km} = \dot{U}_{lm} - \dot{U}_{lk}.$$

Тогда имеем:

$$\sum_{k=2}^{k=n} (\dot{U}_{lk} + \dot{E}_{lk} - i' Z'_{lk} - i'' Z''_{lk}) Y_{lk} = \frac{1}{D_3} \begin{vmatrix} Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} & Z_{23} & \dots & Z_{(n-1)n} \\ Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} & Z_{23} & \dots & Z_{(n-1)n} \\ Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} & Z_{23} & \dots & Z_{(n-1)n} \\ Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} & Z_{23} & \dots & Z_{(n-1)n} \\ i & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{vmatrix} \begin{aligned} & - \dot{U}_{12} - \dot{E}'_{12} + i' Z'_{12} + i'' Z''_{12} \\ & - \dot{U}_{13} - \dot{E}'_{13} + i' Z'_{13} + i'' Z''_{13} \\ & (\dot{U}_{lk} - \dot{U}_{lm} - \dot{E}_{km} + i' Z'_{km} + i'' Z''_{km}) \\ & (\dot{U}_{1(n-1)} - \dot{U}_{1n} - \dot{E}_{(n-1)n} + i' Z'_{(n-1)n} + \\ & \quad 0 + i'' Z''_{(n-1)n}) \end{aligned} \quad (3c)$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} & Z_{23} & \dots & Z_{(n-1)n} \\ Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} & Z_{23} & \dots & Z_{(n-1)n} \\ \dots & \dots \\ Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} & Z_{23} & \dots & Z_{(n-1)n} \\ \dots & \dots \\ Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} & Z_{23} & \dots & Z_{(n-1)n} \\ i & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{vmatrix}$$

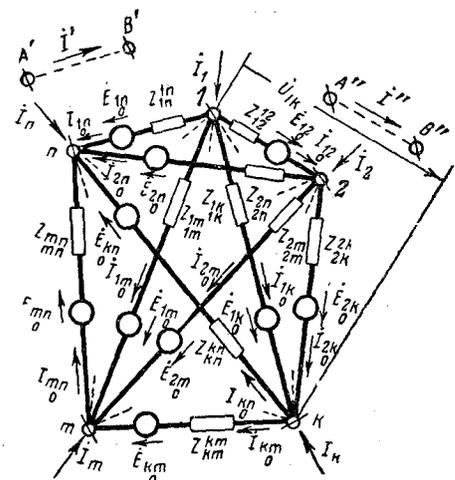


Рис. 3

Соединяя все члены с независимыми величинами $\dot{U}_{12}\dot{U}_{13}\dots\dot{U}_{1n}i''$ и свободный член уравнения (3с) и приравняв нулю коэффициенты при этих величинах, имеем:

$$Y_{1k} = \frac{1}{D_8} \begin{vmatrix} Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{1n} \dots Z_{km} \dots Z_{pk} \dots Z_{(n-1)n} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{1n} \dots Z_{km} \dots Z_{pk} \dots Z_{(n-1)n} & -1 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{1n} \dots Z_{km} \dots Z_{pk} \dots Z_{(n-1)n} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{1n} \dots Z_{km} \dots Z_{pk} \dots Z_{(n-1)n} & 1 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{1n} \dots Z_{km} \dots Z_{pk} \dots Z_{(n-1)n} & -1 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{1n} \dots Z_{km} \dots Z_{pk} \dots Z_{(n-1)n} & 0 \\ \dots & \dots \\ 1 \dots 1 \dots 1 \dots 0 \dots 0 \dots & 0 \end{vmatrix} \quad (4a)$$

$$\sum_{k=2}^{k=n} \dot{E}_{1k} Y_{1k} = -\frac{1}{D_8} \begin{vmatrix} Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{km} \dots Z_{(n-1)n} \dot{E}_{12} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{km} \dots Z_{(n-1)n} \dot{E}_{1k} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{km} \dots Z_{(n-1)n} \dot{E}_{(n-1)n} & 0 \\ \dots & \dots \\ 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (4b)$$

$$\sum_{k=2}^{k=n} Z'_{1k} Y_{1k} = -\frac{1}{D_8} \begin{vmatrix} Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{km} \dots Z_{(n-1)n} Z'_{12} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{km} \dots Z_{(n-1)n} Z'_{1k} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{km} \dots Z_{(n-1)n} Z'_{(n-1)n} & 0 \\ \dots & \dots \\ 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (4c)$$

В выражении для Y_{1k} в нижнем ряду определителя стоят единицы со знаком (+) против столбцов с индексом 1 m . Против столбцов с индексом $m1$ знак был бы отрицательным. Против столбцов, не содержащих в индексе единицы, стоит коэффициент 0. Последняя колонка определителя содержит коэффициент (+1) для рядов с индексом km и (-1) для рядов с индексом mk . Рядом без индекса k в последнем столбце соотвествует коэффициент 0. Аналогичны коэффициенты в нижнем ряду определителей уравнений (4b) и (4c) по отношению к индексу 1.

Составляя подобные уравнения для $(n-1)$ узлов, имеем для проводимости эквивалентной схемы $(n-1)^2$ уравнений вида (4a), из которых $\frac{n(n-1)}{2}$ независимы, а остальные с ними совпадают.

Для э. д. с. и сопротивлений внешней связи имеем по $(n-1)$ уравнений, подобных (4b) и (4c). Так как в многоугольнике имеется $\frac{n(n-1)}{2}$ величин э. д. с. и сопротивлений внешней связи, мы можем $\frac{n(n-1)}{2} - (n-1) = \frac{(n-1)(n-2)}{2}$ этих величин произвольно выбрать, а остальные $(n-4)$ э. д. с. и сопротивлений внешней связи вычислить из уравнений вида (4b) и (4c).

Для того чтобы в ветвях внешней связи $A'B'$ и $A''B''$ ток и напряжение зажимов не изменились, в них приходится включить добавочные сопротивления $Z'_\partial Z''_\partial$, взаимную

связь Z'_∂ и э. д. с. \dot{E}'_∂ и \dot{E}''_∂ . Для ветви $A'B'$:

$$\sum_{km} i_{km} Z_{km} + i' Z'_\partial + i'' Z''_\partial - \dot{E}'_\partial = \sum_{km} i_{km} Z'_{km}$$

Знак \sum распространяется на все ветви многоугольника.

Подставив значение i_{km} из уравнения (3b) и i'_{km} из уравнения (3a) и приравняв нулю коэффициенты при независимых величинах и свободный член уравнения, определяем Z'_∂ ,

Z''_∂ и \dot{E}'_∂ :

$$Z'_\partial = \frac{1}{D_8} \begin{vmatrix} Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{(n-1)n} Z'_{12} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{(n-1)n} Z'_{1k} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{(n-1)n} Z'_{(n-1)n} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z'_{12} \dots Z'_{1k} \dots Z'_{(n-1)n} & 0 \end{vmatrix} + \sum_{km} Z'_{km} Y_{km}, \quad (4d)$$

$$Z''_\partial = \frac{1}{D_8} \begin{vmatrix} Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{(n-1)n} Z''_{12} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{(n-1)n} Z''_{1k} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{(n-1)n} Z''_{(n-1)n} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z'_{12} \dots Z'_{1k} \dots Z'_{(n-1)n} & 0 \end{vmatrix} + \sum_{km} Z'_{km} Z''_{km} Y_{km}, \quad (4e)$$

$$\dot{E}'_\partial = \frac{1}{D_8} \begin{vmatrix} Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{(n-1)n} \dot{E}'_{12} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{(n-1)n} \dot{E}'_{1k} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z_{12} \dots Z_{1k} \dots Z_{(n-1)n} \dot{E}'_{(n-1)n} & 0 \\ \dots & \dots \\ Z'_{12} \quad Z'_{1k} \quad Z'_{(n-1)n} & 0 \end{vmatrix} + \sum_{km} \dot{E}'_{km} Z'_{km} Y_{km} \quad (4f)$$

Для второй ветви внешней связи $A''B''$ получим подобные выражения, причем $Z''_\partial = Z'_\partial$.

Пример. Ланы ветви 1,2 и 3,4 с индуктивной связью (рис. 4, а). Обозначаем:

$$Z_{12} = Z_{12}; \quad Z_{34} = Z_{34}; \quad Z_{34} = Z_{12} = j\omega M.$$

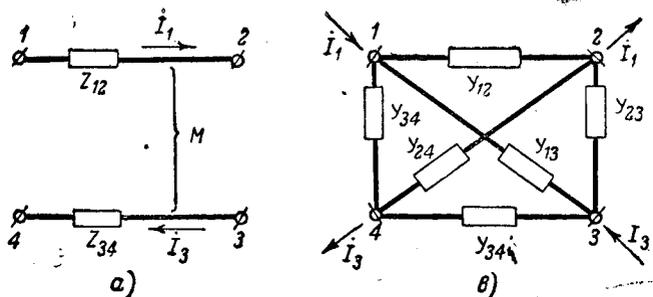


Рис. 4

По уравнению (4а) можем вычислить проводимости ветвей эквивалентного четырехугольника (рис. 4, б):

$$D_3 = \begin{vmatrix} Z_{12} & Z_{34} \\ 12 & 12 \\ Z_{12} & Z_{34} \\ 34 & 34 \end{vmatrix} = Z_{12} Z_{34} - Z_{34} Z_{12} = Z_{12} Z_{34} + \omega^2 M^2.$$

Каждая ветвь исходной схемы (рис. 3, а) имеет в определителе D_3 свою строчку или столбец. Ветви 1,3, 1,4, 2,3, 2,4 тока не проводят. Поэтому их элементы, например $Z_{13} = \infty$, в определителе не фигурируют.

$$Y_{12} = \frac{1}{D_3} \begin{vmatrix} Z_{12} & Z_{34} & -1 \\ 12 & 12 & \\ Z_{12} & Z_{34} & 0 \\ 34 & 34 & \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \frac{Z_{34}}{Z_{12} Z_{34} + \omega^2 M^2};$$

$$Y_{34} = \frac{1}{D_3} \begin{vmatrix} Z_{12} & Z_{34} & 0 \\ 12 & 12 & \\ Z_{12} & Z_{34} & -1 \\ 34 & 34 & \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \frac{Z_{12}}{Z_{12} Z_{34} + \omega^2 M^2};$$

$$Y_{13} = \frac{1}{D_3} \begin{vmatrix} Z_{12} & Z_{34} & 0 \\ 12 & 12 & \\ Z_{12} & Z_{34} & 1 \\ 34 & 34 & \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \frac{j\omega M}{Z_{12} Z_{34} + \omega^2 M^2};$$

$$Y_{14} = \frac{1}{D_3} \begin{vmatrix} Z_{12} & Z_{34} & 0 \\ 12 & 12 & \\ Z_{12} & Z_{34} & -1 \\ 34 & 34 & \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \frac{-j\omega M}{Z_{12} Z_{34} + \omega^2 M^2};$$

$$Y_{24} = \frac{1}{D_3} \begin{vmatrix} Z_{12} & Z_{34} & 0 \\ 12 & 12 & \\ Z_{12} & Z_{34} & -1 \\ 34 & 34 & \\ -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \frac{j\omega M}{Z_{12} Z_{34} + \omega^2 M^2};$$

$$Y_{23} = \frac{1}{D_3} \begin{vmatrix} Z_{12} & Z_{34} & 0 \\ 12 & 12 & \\ Z_{12} & Z_{34} & 1 \\ 34 & 34 & \\ -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \frac{-j\omega M}{Z_{12} Z_{34} + \omega^2 M^2}.$$

При помощи указанных выше преобразований можем любую схему постепенно освободить от внутренней связи. При этом производим преобразования в указанном порядке: преобразуем все последовательные цепи, параллельные цепи и затем освобождаем многоугольник от внутренней связи. Далее можем упростить схему, освобождая ее от внутренних узлов и оставляя лишь главные зажимы, через которые подводится ток из внешней цепи. Внутренний узел можем рассматривать как схему звезды, лучи которой соединяют внутренний узел со всеми остальными узлами схемы.

4. Замещение схемы звезды без внутренней связи (рис. 5) многоугольником без внутренней связи.

Обозначаем элементы эквивалентного многоугольника как в случае 3. Узловой ток для многоугольника

$$i_1 = \sum_{k=2}^{k=n} i_{1k} = \sum_{k=2}^{k=n} (\dot{U}_{1k} + \dot{E}_{1k} - i' Z'_{1k} - i'' Z''_{1k}) Y_{1k}.$$

Из схемы звезды получаем выражение для \dot{U}_{1k} :

$$\dot{U}_{1k} = \left(\frac{i_1}{Y_1} + i' Z'_1 + i'' Z''_1 - \dot{E}_1 \right) - \left(\frac{i_k}{Y_k} + i' Z'_k + i'' Z''_k - \dot{E}_k \right).$$

Подставив значение \dot{U}_{1k} и исключив один из внешних токов, например i_n посредством уравнения $\sum_{k=1}^{k=n} i_k = 0$, имеем:

$$i_1 = \frac{i_1}{Y_1} \sum_{k=2}^{k=n} Y_{1k} + \frac{i_1}{Y_n} Y_{1n} - \sum_{k=2}^{k=n-1} i_k \left(\frac{Y_{1k}}{Y_k} - \frac{Y_{1n}}{Y_n} \right) + \sum_{k=2}^{k=n} (\dot{E}_{1k} - \dot{E}_1 + \dot{E}_k) Y_{1k} \sum_{k=2}^{k=n} i' (Z'_{1k} - Z'_1 + Z'_k) Y_{1k} - \sum_{k=2}^{k=n} i'' (Z''_{1k} - Z''_1 + Z''_k) Y_{1k}.$$

Последнее уравнение для зажима 1 действительно при любых значениях токов $i_1, i_2, \dots, i_{n-1}, i', i''$. Оно может существовать только, если коэффициенты при этих величинах и свободный член уравнения равны нулю.

Коэффициенты при i_1 дают уравнение:

$$1 = \frac{1}{Y_1} \sum_{k=1}^{k=n} Y_{1k} + \frac{Y_{1n}}{Y_n}.$$

Коэффициент при i_k дает: $\frac{Y_{1k}}{Y_k} = \frac{Y_{1n}}{Y_n}$ или $Y_{1k} = Y_k \frac{Y_{1n}}{Y_n}$.

Подставляем значение Y_{1k}

$$1 + \frac{1}{Y_1} \cdot \frac{Y_{1n}}{Y_n} \sum_{k=2}^{k=n} Y_k + \frac{Y_{1n}}{Y_n} = \frac{Y_{1n}}{Y_1 Y_n} \sum_{k=1}^{k=n} Y_k;$$

$$Y_{1n} = \frac{Y_1 Y_n}{\sum_{k=1}^{k=n} Y_k}.$$

Аналогично имеем

$$Y_{km} = \frac{Y_k Y_m}{\sum_{k=1}^{k=n} Y_k}. \quad (5a)$$

Это уравнение есть известная формула преобразования Розена. Приравняв нулю свободный член и коэффициенты при i' и i'' , получаем уравнения для э. д. с. и сопротивлений внешней связи:

$$\sum_{k=2}^{k=n} (\dot{E}_{1k} - \dot{E}_1 + \dot{E}_k) Y_{1k} = 0, \quad (5b)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=2}^{k=n} (Z'_{1k} - Z'_1 + Z'_k) Y_{1k} &= 0 \\ \sum_{k=2}^{k=n} (Z''_{1k} - Z''_1 + Z''_k) Y_{1k} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5c)$$

Составляя уравнения токов $(n-1)$ зажимов схемы, получаем $(n-1)$ уравнений, подобных (5b) и (5c). Поэтому, как и в случае 3, можем произвольно принять $\frac{(n-1)(n-2)}{2}$

э. д. с. и сопротивлений внешней связи эквивалентного многоугольника.

Проверим, как должны измениться элементы ветвей внешней связи $A'B'$ и $A''B''$ при замене схемы звезды многоугольником. Для ветви $A'B'$

$$\sum_{km} i_{km} Z'_{km} + i' Z'_0 + i'' Z''_0 - \dot{E}'_0 = \sum_{k=1}^{k=n} i_k Z'_k.$$

Подставляем значение тока i_{km}

$$i_{km} = (\dot{U}_{km} + \dot{E}_{km} - i' Z'_{km} - i'' Z''_{km}) Y_{km} = \left[\frac{i_k}{Y_k} - \frac{i_m}{Y_m} + \dot{E}_{km} - \dot{E}_k + \dot{E}_m - i' (Z'_{km} - Z'_k + Z'_m) - i'' (Z''_{km} - Z''_k + Z''_m) \right] Y_{km}.$$

$$\sum_{km} \left[\left(\frac{\dot{I}_k}{Y_k} - \frac{\dot{I}_m}{Y_m} \right) + (\dot{E}_{km} - \dot{E}_k + \dot{E}_m) - \dot{I}' (Z'_{km} - Z'_k + Z'_m) - \right. \\ \left. - \dot{I}'' (Z''_{km} - Z''_k + Z''_m) \right] Y_{km} Z'_{km} + \dot{I}' Z'_\delta + \dot{I}'' Z''_\delta - \\ - \dot{E}'_\delta = \sum_{k=1}^{k=n} \dot{I}_k \dot{Z}'_k.$$

Принимая во внимание, что $\sum_{k=1}^{k=n} \dot{I}_k = 0$ и уравнения (5а) и

(5б), можно доказать, что члены с токами $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_k$ в последнем уравнении выпадают. Остается уравнение

$$\dot{I}' \left[Z'_\delta - \sum_{km} (Z'_{km} - Z'_k + Z'_m) Y_{km} Z'_{km} \right] + \\ + \dot{I}'' \left[Z''_\delta - \sum_{km} (Z''_{km} - Z''_k + Z''_m) Y_{km} Z'_{km} \right] - \\ - \left[\dot{E}'_\delta - \sum_{km} (\dot{E}_{km} - \dot{E}_k + \dot{E}_m) Y_{km} Z'_{km} \right].$$

Приравняв нулю коэффициенты при \dot{I}' и \dot{I}'' и свободный член последнего уравнения, имеем:

$$\left. \begin{aligned} Z'_\delta &= \sum_{km} (Z'_{km} - Z'_k + Z'_m) Y_{km} Z'_{km} \\ Z''_\delta &= \sum_{km} (Z''_{km} - Z''_k + Z''_m) Y_{km} Z'_{km} \\ \dot{E}'_\delta &= \sum_{km} (\dot{E}_{km} - \dot{E}_k + \dot{E}_m) Y_{km} Z'_{km} \end{aligned} \right\} \quad (5д)$$

Для величин Z'_δ, Z''_δ и \dot{E}'_δ получим подобные выражения, причем $Z''_\delta = Z'_\delta$.

После ликвидации каждого внутреннего узла в эквивалентной схеме могут оказаться параллельные ветви, которые преобразуем, согласно случаю 2.

При помощи указанных выше четырех видов преобразования можем для любой сложной цепи найти эквивалентную упрощенную цепь без последовательных и параллельных ветвей, внутренней связи и внутренних узлов. При этом мы получаем для сопротивлений ветвей вполне определенные значения. Для э. д. с. и сопротивлений внешней связи мы, однако, имеем неопределенность в случаях 3 и 4. В каждый контур эквивалентной цепи можем ввести э. д. с., пропорциональные сопротивлениям ветвей контура, вызывающие контурный ток, не выходящий за пределы контура¹. Поэтому число э. д. с., которые можем произвольно принять, равно числу независимых контуров эквивалентной схемы. Многоугольник с n узлами действительно и содержит $\frac{(n-1)(n-2)}{2}$ независимых контуров. Совершенно таким

же образом объясняется возможность произвольного выбора сопротивлений внешней связи эквивалентного многоугольника.

В выведенных выше уравнениях можем заметить следующие правила: 1) сопротивления ветвей эквивалентной цепи зависят исключительно от сопротивлений и внутренних связей преобразуемой цепи и не зависят от э. д. с. и внешней связи цепи [уравнения (1а), (2а), (4а) и (5а)]; 2) э. д. с. эквивалентной цепи не зависят от внешней связи [уравнения (1б), (2б), (4б) и (5б)]; 3) сопротивления внешней связи не зависят от э. д. с. системы [уравнения (1с), (2с), (4с) и (5с)].

На основании этих правил можно при нахождении элемен-

¹ См. статьи Д. А. Городский. Преобразование треугольника э. д. с. в эквивалентную звезду. "Электричество" № 19, 1936. Г. М. А. Ингори. Письмо в редакцию. Преобразование звезды э. д. с. в эквивалентный треугольник. "Электричество" № 3, 1937. С. В. Страхов. Еще о преобразованиях схем, содержащих э. д. с. "Электричество" № 19, 1937.

тов эквивалентной цепи выбросить из исходной схемы те величины, которые не влияют на искомые элементы. Например, при определении сопротивлений ветвей эквивалентной схемы можем по правилу¹ принять равными нулю все э. д. с. и сопротивления внешней связи исходной цепи.

В дальнейшем укажем путь непосредственного нахождения элементов эквивалентного многоугольника — без постепенных, промежуточных преобразований.

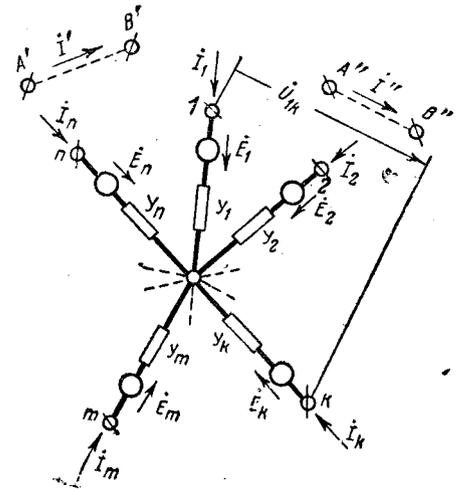


Рис. 5

5. Пусть исходная преобразуемая цепь имеет n зажимов и три внутренних узла, которые обозначим индексами r, s и t . Эта цепь имеет индуктивную связь с двумя внешними ветвями $A'B'$ и $A''B''$. На рис. 6 показана лишь ветвь km , остальные ветви цепи показаны пунктиром.

Для нахождения сопротивлений ветвей эквивалентного многоугольника мы рассматриваем цепь рис. 6 без э. д. с. ($\dot{E}_{km} = 0$) и внешней связи ($Z'_{km} = 0$). Внешней цепи придаем определенную простую форму: принимаем, что все зажимы, кроме одного (например, зажима 1 на рис. 7, а), коротко замкнуты. На рис. 7, а показаны углы схемы, ветвь km и внешняя цепь. Короткое замыкание зажимов аналитически выражается следующим образом:

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_{13} = \dots = \dot{U}_{1k} = \dot{U}_{1n} = \dots = \dot{U}_{1r} = \dot{U}_1.$$

Для схемы упрощенной цепи (рис. 7, б) без внутренней связи и внутренних узлов, имеем:

$$\dot{I}_k = -\dot{U}_1 Y_{1k}.$$

Для схемы рис. 7, а можем составить ряд уравнений, подобных уравнениям (3, а). Из этих уравнений можем выразить

$$\text{ток } \dot{I}_k = \sum_{m=1}^{m=n} \dot{I}_{km} + \dot{I}_{kr} + \dot{I}_{ks} + \dot{I}_{kt} \quad \text{в виде определителя}$$

подобно определителю в уравнении (3с). Раскрывая определитель по последнему столбцу и соединив подобные члены, получаем:

$$\dot{I}_k = A_{k1} \dot{U}_1 + A_{kr} \dot{U}_r + A_{ks} \dot{U}_s + A_{kt} \dot{U}_t.$$

Для токов внутренних узлов имеем аналогично:

$$\dot{I}_r = 0 = A_{r1} \dot{U}_1 + A_{rr} \dot{U}_r + A_{rs} \dot{U}_s + A_{rt} \dot{U}_t,$$

$$\dot{I}_s = 0 = A_{s1} \dot{U}_1 + A_{sr} \dot{U}_r + A_{ss} \dot{U}_s + A_{st} \dot{U}_t,$$

$$\dot{I}_t = 0 = A_{t1} \dot{U}_1 + A_{tr} \dot{U}_r + A_{ts} \dot{U}_s + A_{tt} \dot{U}_t.$$

Из последних уравнений исключаем напряжения внутренних узлов \dot{U}_r, \dot{U}_s и \dot{U}_t , составив определитель по отношению к этим величинам и приравнявая его нулю:

$$\begin{vmatrix} -\dot{I}_k + A_{k1} \dot{U}_1 & A_{kr} & A_{ks} & A_{kt} \\ A_{r1} \dot{U}_1 & A_{rr} & A_{rs} & A_{rt} \\ A_{s1} \dot{U}_1 & A_{sr} & A_{ss} & A_{st} \\ A_{t1} \dot{U}_1 & A_{tr} & A_{ts} & A_{tt} \end{vmatrix} = 0$$

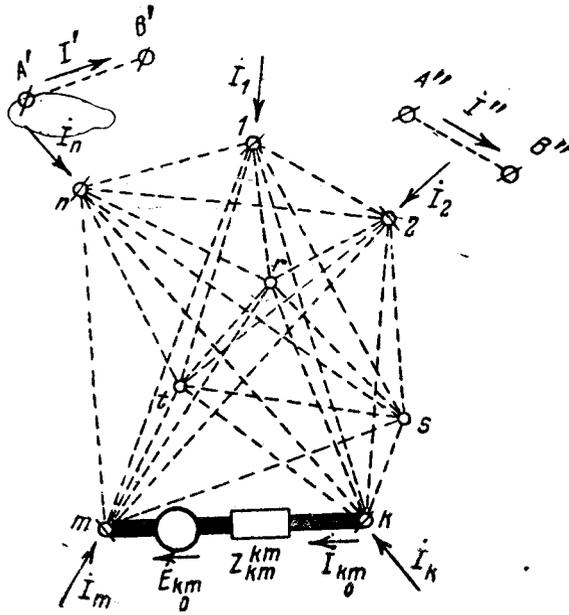


Рис. 6

Отсюда:

$$Y_{1k} = - \begin{vmatrix} A_{r_1} & A_{kr} & A_{ks} & A_{kt} \\ A_{r_1} & A_{rr} & A_{rs} & A_{rt} \\ A_{s_1} & A_{sr} & A_{ss} & A_{st} \\ A_{t_1} & A_{tr} & A_{ts} & A_{tt} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_{rr} & A_{rs} & A_{rt} \\ A_{sr} & A_{ss} & A_{st} \\ A_{tr} & A_{ts} & A_{tt} \end{vmatrix} \quad (6a)$$

Таким образом находим проводимости остальных ветвей эквивалентного многоугольника².

Уравнения для э. д. с. систем находим, принимая исходную схему по рис. 8, а с внутренней связью и внутренними узлами, а эквивалентный многоугольник без внутренних узлов и внутренней связи по рис. 8, б. Цепи содержат э. д. с., но не содержат внешней связи ($Z'_{km} = 0$). Внешняя цепь замыкает накоротко все зажимы схемы.

Для эквивалентной схемы (рис. 8, б) имеем:

$$i_k = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{m=n} \dot{E}_{km} Y_{km}$$

Для исходной схемы (рис. 8, а) имеем ряд уравнений, подобных уравнениям (3а). Из этих уравнений можем выразить ток узла k в виде:

$$i_k = \sum_{pm}^{m=1} A_{pm} \dot{E}_{pm} + B_{kr} \dot{U}_r + B_{ks} \dot{U}_s + B_{kt} \dot{U}_t$$

Аналогично выражаем токи узлов r s и t :

$$i_r = 0 = \sum_{pm} A_{pm} \dot{E}_{pm} + A_{rr} \dot{U}_r + A_{rs} \dot{U}_s + A_{rt} \dot{U}_t$$

$$i_s = 0 = \sum_{pm} A_{pm} \dot{E}_{pm} + A_{sr} \dot{U}_r + A_{ss} \dot{U}_s + A_{st} \dot{U}_t$$

$$i_t = 0 = \sum_{pm} A_{pm} \dot{E}_{pm} + A_{tr} \dot{U}_r + A_{ts} \dot{U}_s + A_{tt} \dot{U}_t$$

Исключая из последних уравнений \dot{U}_r , \dot{U}_s и \dot{U}_t и приравняв друг другу полученные для обеих схем выражения

² Этот же способ исключения потенциалов внутренних узлов приведен в статье А. Н. Милых. Обобщенный метод трансформации электрических цепей. „Электричество“ № 9, 1939.

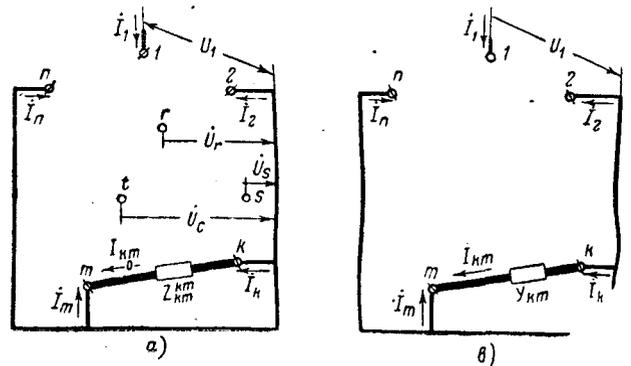


Рис. 7

для тока i_k , имеем:

$$\sum_{m=1}^{m=n} \dot{E}_{km} Y_{km} = \begin{vmatrix} \sum_{pm} A_{pm} \dot{E}_{pm} & A_{kr} & A_{ks} & A_{kt} \\ \sum_{pm} A_{pm} \dot{E}_{pm} & A_{rr} & A_{rs} & A_{rt} \\ \sum_{pm} A_{pm} \dot{E}_{pm} & A_{sr} & A_{ss} & A_{st} \\ \sum_{pm} A_{pm} \dot{E}_{pm} & A_{tr} & A_{ts} & A_{tt} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_{rr} & A_{rs} & A_{rt} \\ A_{sr} & A_{ss} & A_{st} \\ A_{tr} & A_{ts} & A_{tt} \end{vmatrix} \quad (6b)$$

Составляя подобные уравнения для $(n-1)$ зажимов схемы, получаем $(n-1)$ уравнений для э. д. с. эквивалентного многоугольника.

Уравнения для сопротивлений внешней связи получим, исходя из тех же схем рис. 8, но заменяя э. д. с. сопротивлениями внешней связи. Получим подобно предыдущему:

$$\sum_{m=1}^{m=n} Z'_{km} Y_{km} = \begin{vmatrix} \sum_{pm} A_{pm} Z'_{pm} & A_{kr} & A_{ks} & A_{kt} \\ \sum_{pm} A_{pm} Z'_{pm} & A_{rr} & A_{rs} & A_{rt} \\ \sum_{pm} A_{pm} Z'_{pm} & A_{sr} & A_{ss} & A_{st} \\ \sum_{pm} A_{pm} Z'_{pm} & A_{tr} & A_{ts} & A_{tt} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_{rr} & A_{rs} & A_{rt} \\ A_{sr} & A_{ss} & A_{st} \\ A_{tr} & A_{ts} & A_{tt} \end{vmatrix} \quad (6c)$$

Имеем $(n-1)$ подобных уравнений для связи ветви $A'B'$.

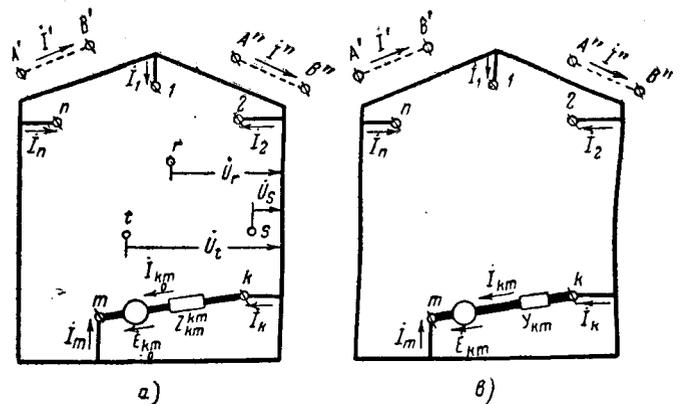


Рис. 8

Для определения добавочных элементов ветвей внешней связи сравниваем падения напряжения, вызванные в этих ветвях токами ветвей эквивалентных схем рис. 8. При этом для нахождения Z'_d сравниваем напряжения ветви $A'B'$, предполагая отсутствие э. д. с. ($\dot{E}_{km} = 0$) и токов остальных

ветвей внешней связи ($i'' = 0$). Для получения Z''_d принимаем $\dot{E}_{km} = 0$ и $i' = 0$. Для определения же \dot{E}'_d принимаем

$i' = i'' = 0$. В получающихся уравнениях исключаем напряжения внутренних узлов, подобно предыдущему, из условия $i_7 = i_8 = i_9 = 0$.

Выше мы принимали число ветвей внешней связи равным

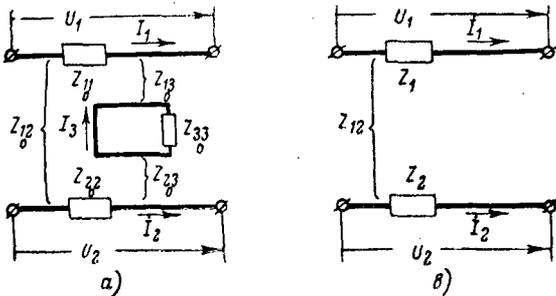


Рис. 9

двум и обозначали эти ветви $A'B'$ и $A''B''$. Однако число ветвей внешней связи может быть и другим. Дополнительные элементы всех ветвей внешней связи образуются подобно элементам приведенных нами двух ветвей. Можем, однако, и совершенно исключить внешнюю связь, включив зажимы ветвей $A'Z'A''B''$ и т. д. в число n зажимов эквивалентного многоугольника.

При вычислении сопротивлений ветвей эквивалентных схем можем получить комплексы с отрицательной действительной составляющей. Такие отрицательные активные сопротивления могут быть искусственно осуществлены в схемах коллекторной машины с последовательным возбуждением или в схемах электронных ламп с обратной связью.

Для взаимной связи ветвей эквивалентных схем могут получиться величины, состоящие из действительной активной и мнимой реактивной составляющей. Такую связь наиболее просто можно осуществить следующей схемой: две ветви индуктивно связаны между собой и с третьей — замкнутой цепью (рис. 9, а). Для этих цепей пишем уравнения:

$$\dot{U}_1 = i_1 Z_{11} + i_2 Z_{21} + i_3 Z_{31},$$

$$\dot{U}_2 = i_1 Z_{12} + i_2 Z_{22} + i_3 Z_{32},$$

$$\dot{U}_3 = i_1 Z_{13} + i_2 Z_{23} + i_3 Z_{33} = 0.$$

Из третьего уравнения находим I_3 и подставляем его значение в первые два уравнения. Тогда имеем:

$$\dot{U}_1 = i_1 \left(Z_{11} - \frac{Z_{13}^2}{Z_{33}} \right) + i_2 \left(Z_{12} - \frac{Z_{13}Z_{23}}{Z_{33}} \right),$$

$$\dot{U}_2 = i_1 \left(Z_{12} - \frac{Z_{13}Z_{23}}{Z_{33}} \right) + i_2 \left(Z_{22} - \frac{Z_{23}^2}{Z_{33}} \right).$$

Для эквивалентной схемы без промежуточной цепи (рис. 8, б)

$$\dot{U}_1 = i_1 Z_{12} + i_2 Z_{12},$$

$$\dot{U}_2 = i_1 Z_{12} + i_2 Z_2.$$

Сравнивая последние уравнения, находим:

$$Z_1 = Z_{11} - \frac{Z_{13}Z_{13}}{Z_{33}}; \quad Z_2 = Z_{22} - \frac{Z_{23}Z_{23}}{Z_{33}};$$

$$Z_{12} = Z_{12} - \frac{Z_{13}Z_{23}}{Z_{33}}.$$

Принимая, что

$$Z_{12} = j\omega M_{12}; \quad Z_{13} = j\omega M_{13}; \quad Z_{23} = j\omega M_{23}; \quad Z_{33} = r_{33} + jx_{33},$$

имеем:

$$Z_{12} = j\omega M_{12} - \frac{j\omega M_{13}j\omega M_{23}}{r_{33} + jx_{33}} = \frac{\omega^2 M_{13}M_{23}}{r_{33}^2 + x_{33}^2} r_{33} +$$

$$+ j \left(\omega M_{12} - \frac{\omega^2 M_{13}M_{23}}{r_{33}^2 + x_{33}^2} x_{33} \right).$$

Как видим, Z_{12} содержит активную составляющую.

Применение механического интегратора для исследования динамической устойчивости синхронного двигателя

Инж. В. И. ГОРУШКИН

Энергетический институт Академии Наук СССР

Математическое исследование переходных процессов в синхронных машинах, как известно, приводит к уравнениям, которые не могут быть решены в общем виде. Для каждого отдельного случая можно получить решение по методу последовательных интервалов, но этот способ сопряжен с большой затратой времени и он непригоден, когда надо решить ряд вариантов.

Машина для решения дифференциальных уравнений (Энергетического института Академии Наук СССР), построенная под руководством члена-корр. Академии Наук И. С. Брук, позволяет легко обойти эти трудности.

Ниже изложены результаты выполненного при помощи этой машины исследования динамической устойчивости синхронного двигателя при переходе его из генераторного режима в моторный.

Движение ротора синхронной машины определяется соотношением:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_L - T. \quad (1)$$

Сделаем следующие предположения: машина присоединена к шинам бесконечно большой мощности; активное сопротивление статора $r=0$; напряжение, подводимое к обмотке возбуждения, не меняется; машина не имеет демпферной обмотки. При этих условиях величина T определится из уравнения:

$$T = \frac{E_d e}{x_d} \sin \delta + e^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} \sin 2\delta + e^2 \frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \sin \delta \varepsilon^{T_d} \int_{u=0}^{u=t} \frac{u}{\varepsilon^{T_d}} \cos \delta(u) \cdot \delta'(u) du. \quad (2)$$

Последний член этого уравнения дает момент, обусловленный переходными токами в обмотке возбуждения. Влияние демпферной обмотки можно приближенно учесть, введя в уравнение движения ротора величину $D \frac{d\delta}{dt}$, где D — постоянный коэффициент.

Тогда уравнение (1) приобретает вид:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_L - T - D \frac{d\delta}{dt}. \quad (3)$$

Уравнение (3) было принято в качестве основного для решения поставленной задачи.

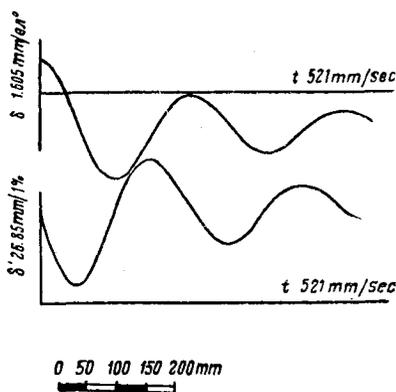


Рис. 1. Качания ротора синхронной машины после мгновенного изменения нагрузки от $T_L=1,48$ до $T_L=-1,48$

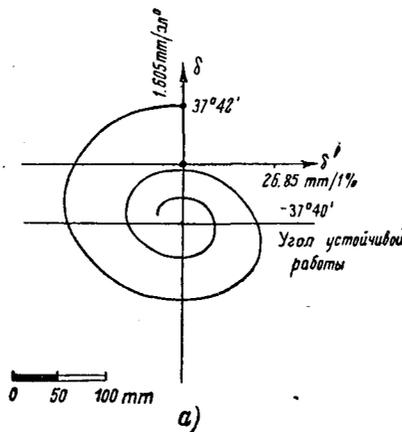


Рис. 2. Качания ротора синхронной машины, записанные на фазовой плоскости: а — после мгновенного изменения нагрузки от $T_L=1,48$ до $T_L=-1,48$; в — после мгновенного изменения нагрузки от $T_L=0$ до $T_L=-1,85$

Уравнение (2) получается в результате решения следующей системы дифференциальных уравнений

$$\psi_q = -e \sin \delta = -x_q i_q, \quad (4)$$

$$\psi_d = e \cos \delta = G''(p) E_{fd} - x'_d(p) i_d, \quad (5)$$

$$T = \psi_d i_q - \psi_q i_d, \quad (6)$$

в которой

$$G''(p) = \frac{x_{afd}}{p x_{ffa} + r_{fd}}, \quad (7)$$

$$x'_d(p) = x_d - \frac{p x_{afd}}{p x_{ffa} + r_{fd}}. \quad (8)$$

Для решения на машине уравнения (3) и (5) были представлены в виде:

$$M \delta'' = \int T_L dt - D \int \delta' dt - \int \psi_d i_q dt + \int \psi_q i_d dt, \quad (9)$$

$$e \cos \delta = \psi_d = \frac{1}{T_{d_0}} E_{d_0} t - x'_d i_d - \frac{1}{T_{d_0}} \int \psi_d dt - \frac{x_d}{T_{d_0}} \int i_d dt \quad (10)$$

и использовалось еще уравнение

$$\delta = \int \delta' dt. \quad (11)$$

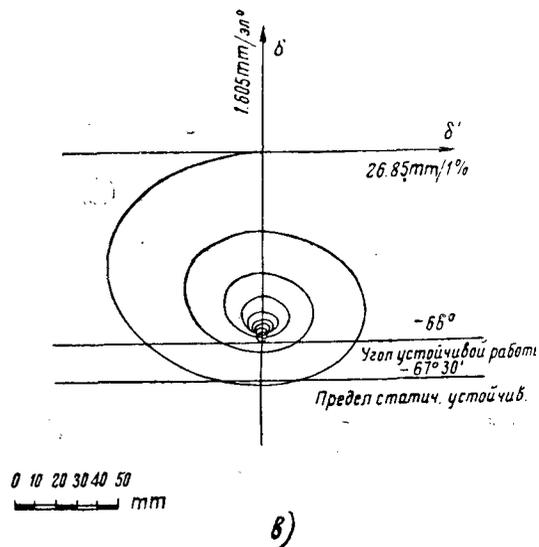
В соответствии с последней системой уравнений была составлена принципиальная и рабочая схемы интегрирования. Параметры уравнений выбрали следующие:

$$x_d = 1,22; x_q = 0,61; T_{d_0} = 938 \text{ рад}; x'_d = 0,305; D = 11,67 \text{ рад}; M = 1360 \text{ рад}; E_{d_0} = 2,15.$$

Эти параметры приблизительно соответствуют двигателю МС 324—15/14, 4750 kVA, 6000 V, 457 A, 428 об/мин.

Масштабы имели значения: $t=4,42$ об/рад; ψ_d и ψ_q — 180 об/ед; $\delta' = 1790$ об/ед = 17,9 об/1%; $\delta = 61,4$ об/рад, $T_L = 19,2$ об/ед.

В уравнение движения ротора входит величина T_L , включающая момент нагрузки, моменты трения в подшипниках и пр. Можно было бы задаться любым законом изменения T_L . Мы считаем, что T_L мгновенно изменяется, а затем остается постоянным. Будем для краткости называть T_L моментом нагрузки или просто „нагрузкой“. При помощи машины были сняты кривые для ряда случаев перехода из генераторного режима в моторный, или наоборот (при $r=0$ это не



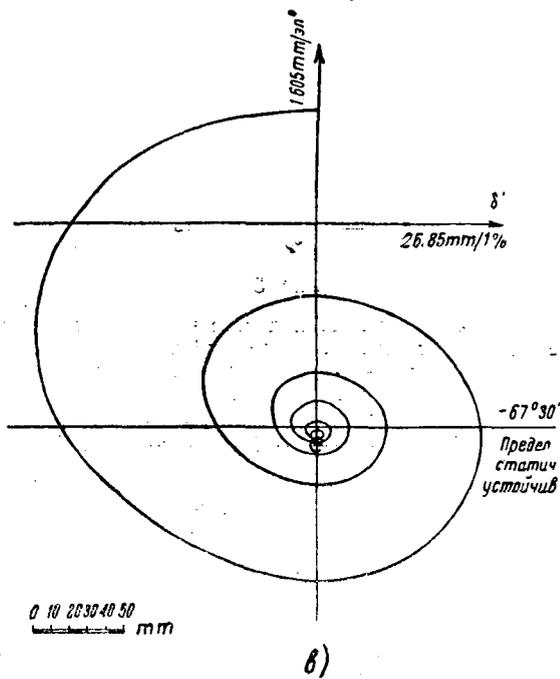
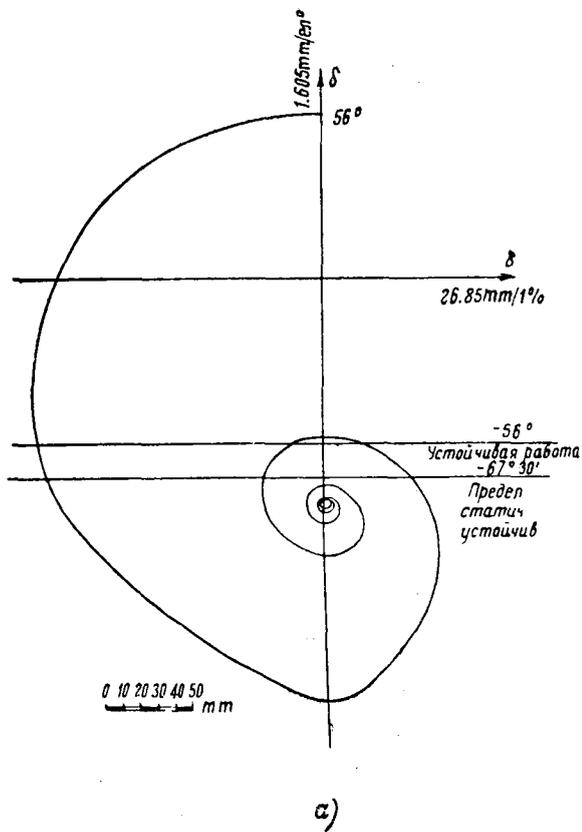


Рис. 3. Качания ротора синхронной машины, записанные на фазовой плоскости: а — после мгновенного изменения нагрузки от $T_L = 1,85$ до $T_L = -1,85$; в — после мгновенного изменения нагрузки $T_L = 1,45$ до $T_L = -2,05$

имеет значения). Каждый раз, в соответствии с заданной генераторной нагрузкой, определялся угол δ_0 .

По углу вычислялись ψ_{d_0} , ψ_{q_0} и i_{d_0} . Ток по продольной оси определялся по формуле:

$$i_{d_0} = \frac{E_d - \psi_{d_0}}{x_d}$$

По этим величинам и известным нам масштабам вычислялись начальные установки на операторных досках и начальные смещения на интеграторах.

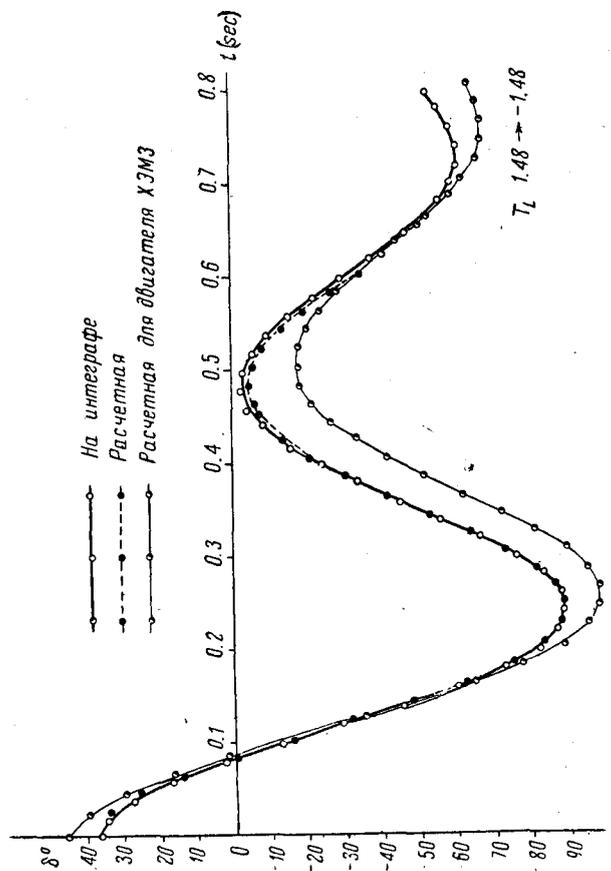


Рис. 4

На рис. 1—3 воспроизведены кривые, полученные при помощи интегратора. Рис. 1 воспроизводит развитие качаний ротора во времени. На рис. 2 и 3 процесс качаний дан на фазовой плоскости, — по одной оси отложен угол δ , а по другой —

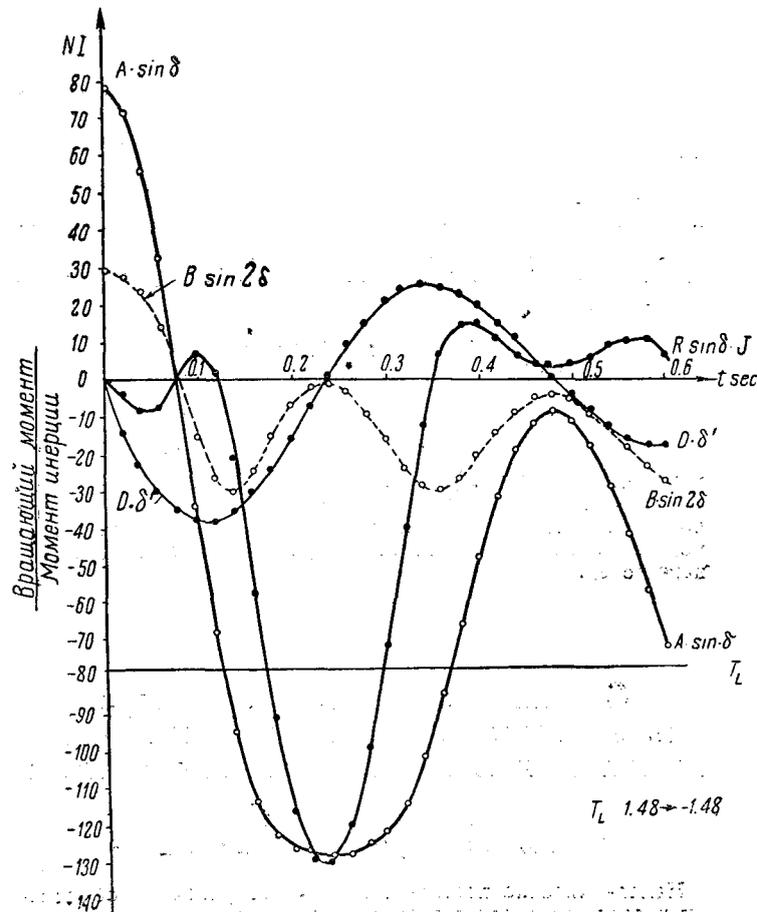


Рис. 5

его производная по времени δ' . Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Динамическая устойчивость данного синхронного двигателя при переходе из моторного режима в генераторный определяется пределом статической устойчивости, если нагрузка, приложенная толчком, в дальнейшем остается неизменной. Если нагрузка не превосходит предела статической устойчивости, то двигатель во всех случаях после ряда качаний приходит к углу устойчивой работы. Даже в том случае, когда была дана нагрузка, превосходящая предел статической устойчивости (рис. 3, в), ротор некоторое время колебался вокруг угла, соответствующего приблизительно максимальному статическому моменту. Только когда колебания затухли, машина начала выпадать из синхронизма.

Интересна кривая δ рис. 3. Когда колебания затухли, то оказалось, что δ соответствует неустойчивой части кривой. Однако электрический момент оказался все же больше, чем момент нагрузки. В результате ротор двинулся к углу устойчивой работы.

2. Колебания совершаются относительно медленно, с периодом порядка 0,5 сек. Это позволяет повысить устойчивость, воздействуя на цепь возбуждения. Для случая, когда машина должна была выпасть из синхронизма, колебания затухли только приблизительно через 2 sec.

3. Колебания совершаются не вокруг угла устойчивой работы, а вокруг точки, которая сама меняет свое положение во время качаний.

4. При помощи интегратора ЭНИН можно с успехом решать относительно сложные и громоздкие уравнения. Проектирование и расчет схемы интегрирования заняли 6—8 дней. Сборка и регулирование схемы заняли 3 дня. Запись одной кривой требовала 1—2 ч.

Таким образом для случая, когда при помощи одной схемы нужно получить большое число кривых, применение интегратора дает поразительный выигрыш во времени. Однако для получения одной-двух кривых численные методы должны оказаться более экономичными.

Для случая мгновенного изменения нагрузки от 1,48 до—1,48 был произведен расчет качаний ротора по методу последовательных интервалов. На рис. 4 кривая, полученная путем расчета, сопоставляется с соответствующей кривой, полученной на интеграторе, — совпадение результатов получилось хорошее. Кроме того, на рис. 4 приведена кривая движения ротора для двигателя с параметрами, отличающимися от тех, которые были нами приняты. Оказалось, что характер движения не изменился, что говорит о возможности распространения полученных результатов на некоторые другие машины.

5. На рис. 5 даны кривые моментов двигателя, полученные по уравнению (2) и (3) расчетом по методу последовательных интервалов. Кривые показывают, что высокая динамическая устойчивость машины обусловлена в первую очередь переходными токами в обмотке возбуждения.

Несколько сложнее вопрос о роли демпферной обмотки. И. С. Рогачев в статье „Динамическая устойчивость синхронных двигателей“ („Электричество“ № 7, 1940) исследует устойчивость двигателей без учета демпферной обмотки. Для нашего двигателя предел статической устойчивости с учетом реактивного момента

$$P_m = 1,92; k = \frac{u}{E_{d_0}} \cdot \frac{x_d - x'_d}{x'_d} = 1,39.$$

Для $N_e = \frac{1,85}{1,92} = 0,965$ и $k = 1,39$ по кривой рис. 2 указанной статьи $N_m \leq 0,6$. Интегратор дал $N_m \leq 0,965$. Такая большая разница указывает на необходимость разработки методов, позволяющих учитывать влияние демпферной обмотки на динамическую устойчивость синхронных двигателей.

Соединение обмоток генератора переменного тока при намагничивании постоянных магнитов рабочими обмотками

Инж. А. С. КАНТЕР

Всесоюзный электротехнический институт

Намагничивание постоянных магнитов рабочими обмотками в собранном состоянии в машине или аппарате согласно предложению автора получило широкое применение на практике. Проведенные исследования нестационарных

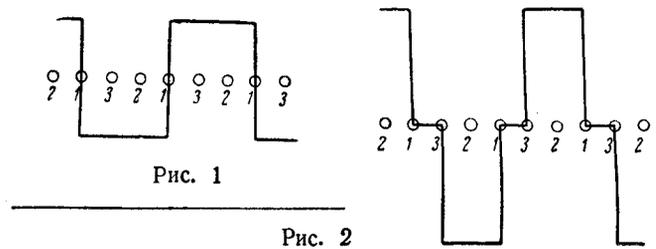


Рис. 1

Рис. 2

процессов, происходящих при намагничивании рабочими обмотками, и получающийся при этом перегрев обмоток указали, что возможно допустить плотность тока в обмотке от 150 до 320 А/мм² при длительности намагничивания от 0,5 до 0,1 sec [1]. Для намагничивания достаточно приключить клеммы рабочей обмотки на указанное выше время к сети постоянного или переменного тока соответствующего напряжения. Время намагничивания ограничивается плавкими предохранителями или максимальным автоматом. На практике установлено, что для полного намагничивания целесообразно приключать рабочую обмотку к сети два-три раза.

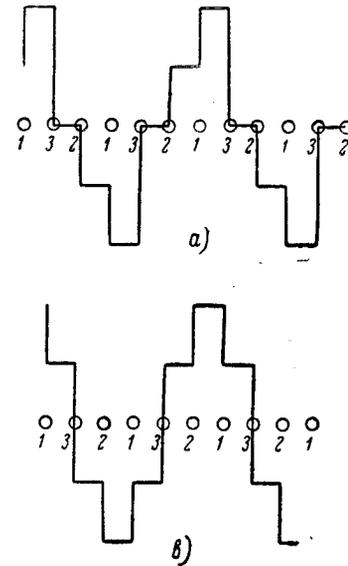


Рис. 3

При намагничивании постоянных магнитов в генераторах однофазного тока со статором обычной цилиндрической формы или с явно выраженными полюсами однофазную обмотку приключают к намагничивающей сети. Соединение обмотки при намагничивании в две или несколько параллельных групп увеличивает в соответствующее число раз намагничивающие ампервитки.

При проектировании машины необходимо поэтому учитывать условие намагничивания магнитов рабочими обмотками.

В генераторе трехфазного тока постоянные магниты возможно намагнитить при различном соединении обмоток как от одной, так и от двух или трех фаз. Ниже разберем основные соединения обмоток генератора и получаемые при этом м. д. с.

Обозначим число витков в фазе w , сопротивление фазы R , напряжение намагничивающей сети U , ток фазы I .

Определяем для различных соединений обмоток м. д. с. Построение проводим в одном условном масштабе, принимая ток фазы равным единице.

Намагничивание от одной фазы. Магнитодвижущая сила для этого случая представлена на рис. 1. Максимальные ампервитки в условном масштабе равны единице. Ток фазы

$$I = \frac{U}{R}.$$

Намагничивание от двух фаз, соединенных последовательно. В зависимости от направления тока фазы возможны два варианта распределения м. д. с., но практически ценен лишь вариант¹, представленный на рис. 2. Сила тока фазы для

$$\text{обоих вариантов } I = \frac{U}{2R}.$$

¹ Другой вариант намагничивания дает поле той же амплитуды, что и вариант рис. 2, но слишком узкое, действующее только на часть магнита.

Соединение обмоток	Ток фазы (относит.)	Максимальная амплитуда при токе, равном 1	Максимальная м. д. с.
Одна фаза	1	1	1
Две фазы последовательно	$\frac{1}{2}$	2	1
Соединение в звезду . . .	$\frac{2}{3}$	2	$\frac{4}{3}$
Соединение в треугольник	1	2	2
Распределенная обмотка. Соединение в звезду . .	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{2}$	1
Распределенная обмотка. Соединение в треугольник	1	2	2

Соединение обмоток статора в звезду. При построении картины м. д. с. необходимо учесть, что в одной фазе протекает полный ток, тогда как в каждой из двух других только половинное значение. В зависимости от направления тока в фазах возможны различные варианты картины м. д. с.

На рис. 3 представлены два из возможных вариантов (а и б). В этих случаях максимальная амплитуда м. д. с. в условном масштабе равна единице. Очевидно далее, что при этом способе соединения обмоток максимальная амплитуда м. д. с. при любом варианте не может иметь значения, равного двум. Сопротивление обмоток при соединении по этой схеме равно $\frac{3}{2}R$, ток основной фазы $I = \frac{2U}{3R}$.

Соединение обмоток в треугольник (схема рис. 4). Сложение м. д. с. отдельных фаз дает, очевидно, картину м. д. с., представленную на рис. 2, так как при сложении безразлично, соединены ли фазы последовательно, как было указано выше, или параллельно, что имеет место при соединении в треугольник. Сила тока фазы $I = \frac{U}{R}$.

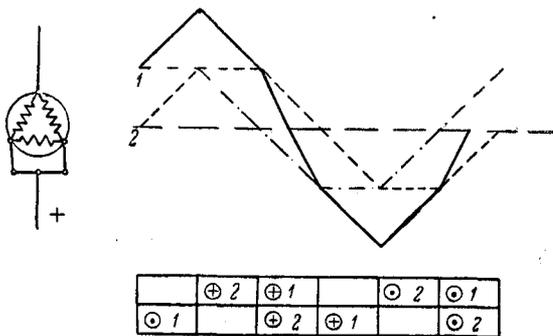


Рис. 4

Все приведенные выше построения выполнены для обмоток с одним пазом на полюс и фазу. В обмотках с двумя, тремя и т. д. пазами на полюс и фазу соотношения, указанные выше, остаются в основном те же.

Для распределенных обмоток с укороченным шагом, когда в каждом пазу расположены разные фазы (как показано под диаграммой м. д. с. рис. 4), построение м. д. с., например для соединения в треугольник, приведено на рис. 4. Максимальная амплитуда м. д. с. в том же условном масштабе равна двум, ток $I = \frac{U}{R}$. Выше разобраны простейшие схемы соединений при намагничивании рабочими обмотками. Возможно осуществить в случае необходимости и более сложные схемы, например, соединение всех трех фаз параллельно. В большинстве случаев, даже при намагничивании от одной фазы, получается достаточная напряженность намагничивающего

поля. Но наиболее целесообразным для намагничивания является соединение обмоток в треугольник.

При проведении данной работы ценные указания были даны инж. Б. Д. Садовским и инж. М. И. Зем яным. Экспериментальная часть проведена инж. Е. И. Шмариной.

Литература

1. А. С. Кантер. КК вопросу о намагничивании постоянных магнитов. Академия Наук СССР. Известия Отделения технических наук* № 4, 1939.

Критерий устойчивости серий синхронных двигателей при толчках нагрузки

Проф., д-р техн. наук Б. П. АПАРОВ и инж. А. Н. ЛОКШИН

Всесоюзный электротехнический институт

Серии синхронных двигателей обычно не имеют аппаратуры ударного возбуждения, и толчкообразную нагрузку им приходится выдерживать при отсутствии форсировки цепи возбуждения.

Исследованию поведения синхронных двигателей при толчкообразной нагрузке посвящена большая литература¹. Многие авторы исходили из приближенного рассмотрения уравнений движения ротора, вследствие чего они не учитывали полностью все явления. В последнее время эту проблему исследовали W. Wanger и В. М. Матюхин и ими даны более точные методы решения. Наибольший интерес представляет работа В. М. Матюхина, который довел решение проблемы до практических выводов. Однако большинство авторов до сих пор не рассматривало определение критериев устойчивости для серии синхронных двигателей с различными параметрами.

Для облегчения исследования критериев устойчивости ряда серий синхронных машин авторами в основу был положен метод исследования так называемого "типичного синхронного двигателя". Параметры типовых синхронных двигателей были разработаны А. Н. Локшиным применительно к единым всесоюзным сериям синхронных машин.

Делая те же допущения, что и Парк², основное уравнение движения ротора синхронного двигателя при толчке нагрузки можно написать в следующем виде:

$$\frac{d^2 \delta}{d y^2} = N' - \sin \delta - B \sin 2\delta - R \sin \delta \int_0^y e^{-\frac{y-u}{T}} \sin \delta(u) \delta'(u) du + D' \frac{d \delta}{d y} \quad (1)$$

В этом уравнении:

$$D' = \frac{M_N}{A} u^2 \left(\sin^2 \delta \frac{x_d' - x_d''}{x_d' x_d''} T_d'' + \cos^2 \delta \frac{x_q - x_q''}{x_q x_q''} T_q'' \right),$$

$$R = \frac{u}{E} \left(\frac{x_d'}{x_d} - 1 \right), \quad B = \frac{1}{2} \frac{u}{E} \left(\frac{x_d}{x_q} - 1 \right),$$

$$T = T_d' \sqrt{\frac{Ap}{J}}, \quad N' = \frac{N}{A}, \quad A = \frac{Eu}{x_d} M_N;$$

$x_d, x_d', x_d'', x_q, x_q''$ — соответственно продольный, переходный, сверхпереходный, поперечный синхронный и поперечный сверхпереходный синхронные реактансы в относительных единицах;

T_d' — постоянная времени для симметричной составляющей переходного тока к. з. на продольной оси;

T_d'' — то же, для сверхпереходного тока;

T_q — то же, для сверхпереходного тока и поперечной оси;

J — момент инерции привода (в kgm sec^2);

¹ W. Wanger. Bull. ASE, № 3, 1937.

В. М. Матюхин. Динамическая устойчивость синхронных двигателей. "Вестник электропромышленности" № 7, 1939.

² R. H. Park. Trans. AIEE, стр. 716, 1929.

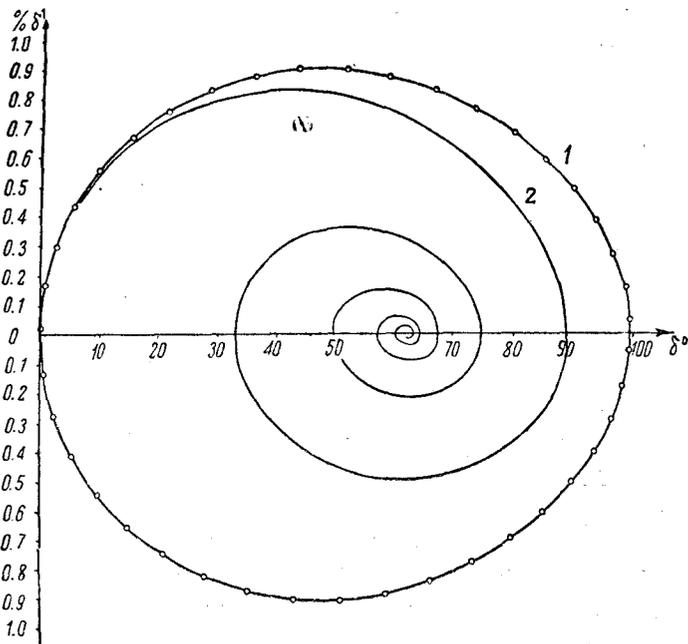


Рис. 1

$\delta' = f(\delta)$. Кривая 1, полученная аналитическим путем, иллюстрирует точность метода step-by-step. На ней нанесены точки, полученные этим методом расчета. Кривая 2 вычислена методом step-by-step для двигателя с параметрами: $T = 4,5$; $R = 0,7$ и $D' = 0,135$

p — число пар полюсов;
 N — нагрузка на валу двигателя (в kgm),

$M_N = \frac{\sqrt{3} UI}{1,03 \cdot n_N}$ — номинальный момент двигателя (kgm);
 u и E — напряжения сети и холостого хода в относительных единицах.

Для типовых синхронных двигателей были взяты следующие параметры: $T = 4,5 - 7,6$; $R = 0,7 - 4,5$; $D' = 0,135 - 1,1$; $B = 0,1 - 0,3$. При определении этих параметров было принято; $x_d = 0,6 - 1,45$; $x_q = 0,45 - 1,00$; $x_d' = 0,2 - 0,45$; $x_d'' = 0,13 - 0,35$; $T_d' = 0,5 - 3,3$ и $T_d'' = 0,01 - 0,05$.

DM_N определялось через асинхронный момент при 5% скольжении по формуле

$$DM_N \left(\frac{d\delta}{dt} \right)_{s=5\%} = M_{a5}$$

Так как

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)_{s=5\%} = \frac{2\pi f \cdot 5}{100} = 15,7,$$

то

$$DM_N = \frac{M_{a5}}{15,7},$$

где M_{a5} — асинхронный момент 5%-ного скольжения при разомкнутой обмотке возбуждения.

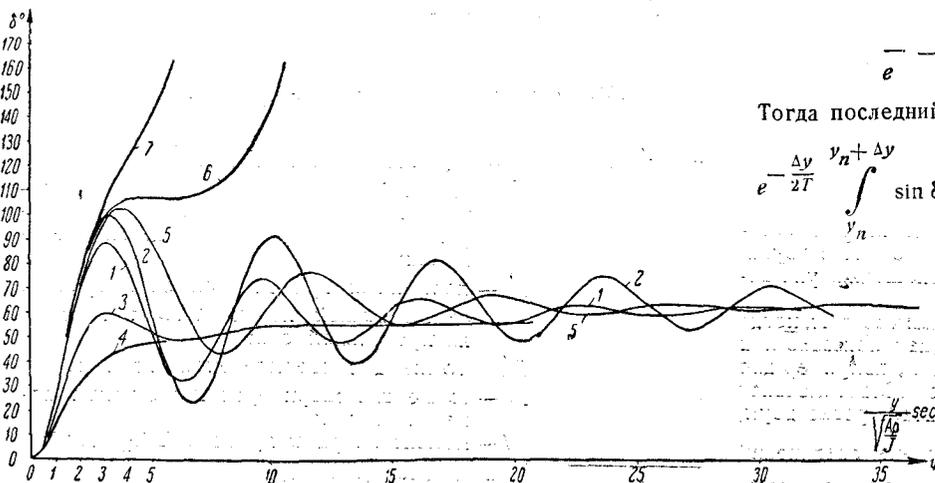


Рис. 2

$\delta = f(t)$. Кривые 1, 2, 3 и 4 построены для $T = 4,5$; $R = 0,7$ и D' соответственно равно 0,135; 0 и 0,8; кривым 5, 6 и 7 соответствуют параметры: $T = 3,5$; $R = 0,5$; $D' = 0,1$; $T = 1,28$; $R = 0,7$; $D' = 0,135$ и $T = 3,5$; $R = 0,3$ и $D' = 0,1$

Значения GD^2 были взяты из данных серий синхронных двигателей МС-315, МС-317, МС-319, МС-321, МС-322, МС-323 МС-324, завода ХЭМЗ им. Сталина.

Для определения критериев устойчивости серий основное уравнение движения ротора решалось методом step-by-step для различных значений параметров T , R и D' типовых синхронных двигателей. Параметр B во всех расчетах принимали равным его нижнему пределу $B = 0,1$. Полагалось, что в отношении устойчивости это наиболее тяжелый случай (хотя влияние B вообще незначительно).

В результате интегрирования уравнения получалась искомая функция $\delta = f(t)$ для ряда случаев.

При расчетах step-by-step было введено следующее уточнение, предложенное А. Н. Локшиным. Интеграл в уравнении обозначают буквой J . К моменту времени y_{n+1} его обычно находят по формуле:

$$J_{n+1} = e^{-\frac{\Delta y}{T}} J_n + [\cos \delta n - \cos \delta n + 1].$$

Локшин предложил находить его по иной формуле:

$$J_{n+1} = e^{-\frac{\Delta y}{T}} J_n + e^{-\frac{\Delta y}{2T}} [\cos \delta n - \cos \delta n + 1].$$

Эту формулу можно получить при помощи следующих выкладок:

$$\begin{aligned} J_{n+1} &= \int_0^{y_n + \Delta y} e^{-\frac{y_n + \Delta y - u}{T}} \sin \delta(u) \delta'(u) du = \\ &= \int_0^{y_n} e^{-\frac{y_n + \Delta y - u}{T}} \sin \delta(u) \delta'(u) du + \\ &+ \int_{y_n}^{y_n + \Delta y} e^{-\frac{y_n + \Delta y - u}{T}} \sin \delta(u) \delta'(u) du. \end{aligned}$$

Или

$$\begin{aligned} J_{n+1} &= e^{-\frac{\Delta y}{T}} \int_0^{y_n} e^{-\frac{y_n - u}{T}} \sin \delta(u) \delta'(u) du + \\ &+ \int_{y_n}^{y_n + \Delta y} e^{-\frac{y_n + \Delta y - u}{T}} \sin \delta(u) \delta'(u) du = \\ &= e^{-\frac{\Delta y}{T}} J_n + \int_{y_n}^{y_n + \Delta y} e^{-\frac{y_n + \Delta y - u}{T}} \sin \delta(u) \delta'(u) du. \end{aligned}$$

Применяя теорему о среднем к последнему интегралу, можно будет (вследствие малости Δy) вынести за знак интеграла значение множителя $e^{-\frac{y_n + \Delta y - u}{T}}$ в средней точке, т. е.

$$e^{-\frac{y_n + \Delta y - (y_n + \frac{\Delta y}{2})}{T}} = e^{-\frac{\Delta y}{2T}}.$$

Тогда последний интеграл запишется в виде:

$$e^{-\frac{\Delta y}{2T}} \int_{y_n}^{y_n + \Delta y} \sin \delta(u) \delta'(u) du = e^{-\frac{\Delta y}{2T}} (\cos \delta n - \cos \delta n + 1).$$

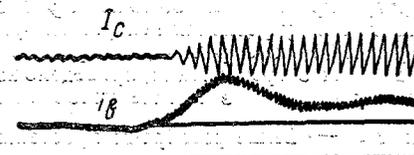


Рис. 3

$$J_{n+1} = e^{-\frac{\Delta y}{T}} J_n + e^{-\frac{\Delta y}{2T}} (\cos \delta n - \cos \delta n + 1),$$

что и требовалось доказать.

Точность проведенных расчетов проверялась по предельному идеализированному случаю: $T = \infty$ и $D' = 0$, когда в уравнении можно выполнить квадратуру и получить для него кривые $\delta' = f(\delta)$ аналитическим путем. На рис. 1 приведена аналитическая кривая и отмечены полученные для этого же случая точки расчетом по методу step-by-step.

Рассмотрение уравнения показывает, что чем больше каждый из параметров T , R и D' , тем устойчивее двигатель. Для определения наименьших возможных значений T , R и D' , при которых типовой синхронный двигатель при толчке нагрузки будет оставаться в синхронизме, были в начале расчетов выбраны наименьшие из приведенных значений этих величин. К этому случаю относится кривая 1 рис. 2.

Для того чтобы сделать эти и дальнейшие расчеты наиболее определенными, позволяющими получить окончательные выводы, к типовому синхронному двигателю, работавшему вхолостую, прилагалась толчком нагрузка, весьма близкая к максимальному моменту по статистической характеристике. Кривая 1 рис. 2 показывает, что при принятых параметрах двигатель имел первый угол вылета $\delta \approx 89^\circ$ и из синхронизма не выпадал.

Для проверки, имеют ли минимальные параметры запас, были выбраны значения параметров, несколько меньше минимальных параметров. Этим значениям соответствует кривая 5 рис. 2. Двигатель имел первый угол вылета, превосходящий 90° , но из синхронизма не выпадал.

При расчете была выяснена роль демпферной клетки на динамическую устойчивость, — вопрос, мало освещенный в литературе. Расчеты были произведены при постоянных значениях $T = 4,5$ и $R = 0,7$ и вариациях: $D' = 0; 0,135; 0,8$ и $1,9$. Результаты расчетов приведены в виде кривых $\delta = f(t)$ (рис. 2; 1, 2, 3 и 4).

Кривые позволяют сделать ряд интересных выводов.

Двигатель достаточно устойчив и при отсутствии демпферной клетки. При значениях демпферных коэффициентов, обычных для современных синхронных двигателей, влияние демпферной клетки на динамическую устойчивость незначительно. Только при больших значениях демпферных коэффициентов ($D' = 0,8$ и $D' = 1,9$) уже начинают уменьшаться угол первого вылета ротора, однако при подобных значениях коэффициентов уже потребуются специальная демпферная клетка.

О роли параметра T можно судить по кривым 1 и 6 рис. 2, построенным при одинаковых значениях $R = 0,7$ и $D' = 0,135$ и вариациях T . Из этих кривых выясняется благоприятное значение увеличения постоянной времени T_d , что и физически понятно, так как свободный ток в цепи возбуждения будет длительный промежуток времени осуществлять „самофорсировку“ возбуждения. Действительно, свободный ток в обмотке возбуждения, увеличиваясь при толчке нагрузки, как бы осуществляет ударное возбуждение и без специальных схем в тех пределах, какие получаются при естественном течении самого нестационарного процесса. На осциллограмме рис. 3 приведен ток в статоре и роторе синхронного двигателя при толчке нагрузки, на которой отчетливо виден подбор тока возбуждения — „самофорсировка“ двигателя; двигатель сам повышает свою устойчивость, противясь выпадению из синхронизма.

Заключение. Произведенное исследование показало, что для синхронных машин во всем широком диапазоне мощностей, которые укладываются в параметры исследованных типовых двигателей, основные критерии динамической устойчивости могут быть выражены следующими правилами:

1. Синхронные двигатели динамически устойчивы при приложении нагрузки толчком, не превосходящей максимального момента по статической характеристике.

2. Серии синхронных двигателей будут удовлетворять первому правилу, когда постоянные T , R и D , которые можно назвать параметрами устойчивости, будут удовлетворять одному из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \text{I} \quad & T \geq 4,5, \quad R \geq 0,7, \quad D' \geq 0 \\ \text{II} \quad & T \geq 3,5, \quad R \geq 0,5, \quad D' \geq 0,1 \end{aligned}$$

Очевидно, для машины без демпферной клетки придется пользоваться только соотношениями 1.

Метод снятия неустойчивой части пусковой характеристики асинхронного двигателя

Инж. Н. А. КИКЛЕВИЧ

Сталино

Идея предлагаемого метода заключается в создании нагрузки с такой характеристикой $M_H = f(n_H)$, при которой возможна вполне устойчивая работа асинхронного двигателя в его так называемой неустойчивой части характеристики. Для этого достаточно соблюдение следующих условий; 1) характеристики двигателя $M_D = f(n_D)$ и нагрузки $M_H = f(n_H)$ пересекаются в точке, соответствующей числу оборотов n_{Dx} , на котором желательно удержать двигатель; 2) при $n_H < n_{Dx}$, $M_D > M_H$; 3) при $n_H > n_{Dx}$, $M_D < M_H$.

Если перечисленные условия соблюдаются, то малейшее отклонение числа оборотов агрегата от n_{Dx} приводит к созданию избыточного момента вращения $M_D - M_H$, возвращающего систему к исходному состоянию.

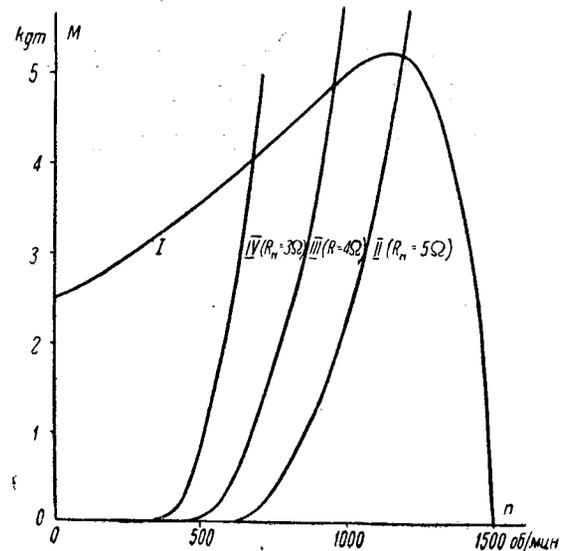


Рис. 1

В качестве такой нагрузки может быть взята динамомашинная последовательного возбуждения. На рис. 1 кривая I дает зависимость $M_D = f(n_D)$ для асинхронного короткозамкнутого двигателя 4,5 кВт, 1430 об/мин, а кривые II, III, IV — такую же зависимость $M_H = f(n_H)$ для динамомашин 6,6 кВт, 1900 об/мин, при различных нагрузочных сопротивлениях R_n в ее цепи. Кривые II, III и IV построены по данным таблицы динамомашин и ее характеристики холостого хода $E = f(n_m)$ при $n = \text{const}$ и поэтому являются приближенными.

Практически изменение числа оборотов агрегата можно осуществить следующим образом.

Асинхронный двигатель запускается при разомкнутой цепи динамомашин. В качестве нагрузочного сопротивления лучше всего применять жидкостный реостат. Постепенно уменьшая сопротивление реостата, можно плавно изменять скорость агрегата до некоторого наименьшего предела, определяемого свойствами динамомашин. Благодаря очень крутой характеристике $M_H = f(n_H)$ динамомашин последовательного возбуждения имеется возможность надежно удерживать асинхронный двигатель в любой точке его характеристики, включая также точки, соответствующие максимумам асинхронных моментов основной и высших гармонических полей. В областях же, близких к максимумам синхронных моментов высших гармонических полей, возможно характеристика динамомашин не будет достаточно крутой, и устойчивая работа окажется невозможной.

В произведенном опыте удавалось снизить число оборотов до 150 в минуту, причем имелась возможность еще больше снизить скорости путем соответственного уменьшения R_n .

Следует отметить, что соотношение между нормальными числами оборотов двигателя и динамомашин было неудачным (1430 и 1900 об/мин). Для расширения пределов использования динамомашин желательно, чтобы ее нормальное число оборотов было на 20—30% меньше синхронного числа оборотов двигателя. В случае отсутствия такой динамомашин можно снизить ее нормальное число оборотов путем

добавления витков в последовательной обмотке возбуждения. Кроме того, при низки n_d возможно вращение динамомашины через передачу. В последнем случае, во избежание чрезмерного повышения числа оборотов динамомашин, в ее цепь должно быть перед пуском агрегата введено достаточно малое нагрузочное сопротивление. Как показали опыты, при введенном в цепь динамомашины нагрузочном сопротивлении она возбуждается при числе оборотов, близком к точке пересечения характеристик $M_d = f(n_d)$ и $M_n = f(n_n)$, и в этом случае можно не опасаться разноса динамомашин при наличии передачи.

Вместо динамомашин с последовательным возбуждением можно пользоваться центробежным насосом или вентилятором. Однако эти машины менее удобны для указанной цели, так как у них $M_n \propto n_n^2$, тогда как у динамомашин последовательного возбуждения в пределах небольших насыщений магнитной цепи $M_n \approx n_n^3$. Применение насосов и вентиляторов возможно, по видимому, только при отсутствии искажений пусковой характеристики асинхронного двигателя, вызванных высшими гармониками поля.

Исправление коэффициента мощности схем газоразрядных ламп

Канд. техн. наук Р. Г. ИЗВЕКОВ
Московский электроламповый завод

По соображениям экономичности газоразрядные лампы переменного тока включают, как правило, с индуктивным балластным сопротивлением. Подобные схемы обычно имеют низкий коэффициент мощности, поэтому эксплуатация более или менее значительного числа ламп требует компенсации реактивной слагающей тока.

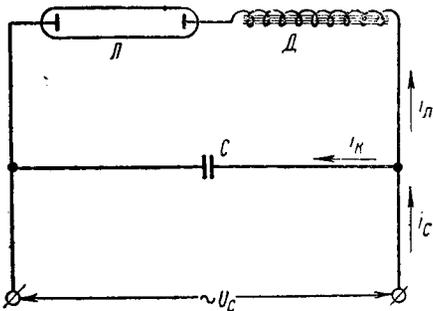


Рис. 1. Схема газоразрядной лампы L с индуктивным балластным сопротивлением — дросселем D и емкостью C для исправления коэффициента мощности

Приблизительно коэффициент мощности схемы газоразрядной лампы¹, если пренебречь активной мощностью включенного последовательно с ней дросселя, будет:

$$k = \cos \varphi = \frac{U_A}{U_c}, \quad (1)$$

где U_A — напряжение на лампе,
 U_c — напряжение сети.

Условия устойчивости разряда и имеющиеся колебания напряжения сети не позволяют выбирать отношение $\frac{U_A}{U_c}$ выше 0,65. Обычно оно бывает ниже и для некоторых типов ламп, например натриевых, порядок этой величины 0,25 — 0,3. Для исправления $\cos \varphi$ схемы прибегают к включению в схему емкости (рис. 1).

Рассмотрим действие схемы при включенной емкости. Напряжение сети

$$U_c = U_{cm} \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где U_{cm} — амплитуда и
 φ — эффективный угол сдвига между напряжением сети и током лампы.

Для упрощения задачи пренебрегаем потерями в дросселе и конденсаторе.

Несинусоидальность кривой напряжения на лампе обусло-

вливает искажение кривой силы тока:

$$i_A = I_{A1m} \sin \omega t + I_{A3m} \sin(3\omega t + \gamma_3) + I_{A5m} \sin(5\omega t + \gamma_5) + \dots \quad (3)$$

Ток конденсатора

$$i_C = \omega C U_{cm} \cos(\omega t + \varphi). \quad (4)$$

Эффективное значение тока, потребляемого из сети,

$$I_c = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (i_A + i_C)^2 d\omega t} = \sqrt{I_A^2 + (\omega C U_c)^2 - 2I_A \omega C U_c q' \sin \varphi}, \quad (5)$$

где q' связан с коэффициентом k_{di_c} искажения кривой тока сети следующим соотношением:

$$q' = \frac{1}{\sqrt{1 + k_{di_c}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_{c3m}}{I_{c1m}}\right)^2 + \left(\frac{I_{c5m}}{I_{c1m}}\right)^2 + \dots}} \quad (6)$$

Дифференцируя формулу (5) по C , найдем оптимальную емкость, при которой ток I_c минимален, а следовательно, коэффициент мощности максимален:

$$C_{\text{опт}} = \frac{I_A}{\omega U_c} \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 + k_{di_c}^2}}. \quad (7)$$

Коэффициент мощности схемы газосветной лампы при включении емкости может быть определен следующим образом.

Ток сети искажен, так как он складывается из синусоидального тока конденсатора и искаженного тока лампы. Его можно представить в виде ряда:

$$i_c = I_{c1m} \sin \omega t + I_{c3m} \sin(3\omega t + \gamma_3) + \dots \quad (8)$$

Коэффициент мощности схемы:

$$k_c = \frac{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi U_{cm} \sin(\omega t + \varphi) \sum_{n=1}^{\infty} I_{cnm} \sin(n\omega t + \gamma_n) d\omega t}{U_c I_c} = \frac{\cos \varphi_c}{\sqrt{1 + k_{di_c}^2}}, \quad (9)$$

где φ_c — эффективный угол сдвига между напряжением и током сети.

Выражение (9) показывает, что коэффициент мощности схемы, вне зависимости от величины присоединенной емкости, всегда меньше единицы, так как ток сети несинусоидален.

Пользуясь выражением (5) и обозначая мощность лампы P , можно представить коэффициент мощности схемы в таком виде:

$$k_c = \frac{P}{U_c \sqrt{I_A^2 + (\omega C U_c)^2 - 2I_A \omega C U_c q' \sin \varphi}}$$

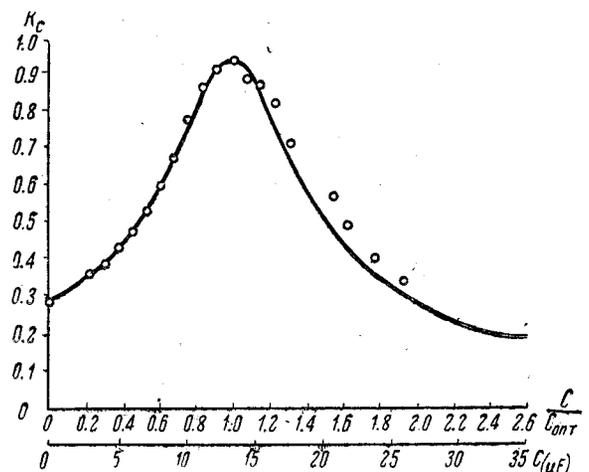


Рис. 2. Кривая изменения коэффициента k_c мощности схемы в зависимости от величины емкости для натриевой лампы типа На-5 (35 W)

¹ Электричество* № 9, 1940.

Пусть коэффициент мощности некомпенсированной схемы равен k . Если положим $C_0 = \frac{C}{C_{\text{опт}}}$, то после некоторых преобразований последнего выражения можно представить k_c в виде функции C_0 и k :

$$k_c = \frac{k}{\sqrt{1 + \frac{\sin^2 \varphi}{1 + k_{d,ic}^2} (C_0^2 - 2C_0)}} \quad (10)$$

На рис. 2 сопоставлена кривая, построенная по уравнению

(10) для схемы натриевой лампы На-5 с опытными данными (точки на кривой).

Для уточнения результатов подсчета потери в приборах включения можно учитывать и считать их сосредоточенными в лампе, что было сделано при построении кривой рис. 2.

Практически наиболее ценный участок кривой находится до $C_{\text{опт}}$, где совпадение расчета с измерениями хорошее. Значениям $C_0 > 1$ соответствует опережающий сдвиг фаз тока относительно напряжения. Расхождение между опытными и расчетными данными при $C > C_{\text{опт}}$ объясняется тем, что по мере увеличения емкости все больше сказываются неучтенные потери в конденсаторах и изменение коэффициента искажения формы кривых.

20 ЛЕТ ГОЭЛРО

Энергетическая выставка к 20-летию плана ГОЭЛРО

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

24 декабря 1940 г. в Москве состоялось торжественное заседание, организованное Мосэнерго, посвященное 20-летию со дня принятия VIII Всероссийским Съездом Советов плана электрификации нашей страны, разработанного по инициативе Владимира Ильича Ленина Государственной Комиссией по электрификации России (ГОЭЛРО).

К юбилейной дате было приурочено открытие организованной народным комиссариатом электростанций СССР большой энергетической выставки в клубе Мосэнерго «Красный луч».

Экспонаты выставки: диаграммы, объемные модели, макеты, карты, фотокопии, образцы продукции промышленности, отражают огромные успехи электрификации страны Советов за 20 лет.

Надпись над светящимся красочным макетом Днепрогэса:

«В смысле производства электрической энергии мы стояли на самом последнем месте. Теперь мы выдвинулись на одно из первых мест». (Сталин), говорит с предельной ясностью об успехах, которыми может гордиться вся страна.

Энергетическая юбилейная выставка занимает 3 зала и начинается с раздела «Электричество — материальная основа социализма».

Цитаты из произведений Маркса, Энгельса, Ленина, Сталина характеризуют огромное значение электричества.

«Царствование его величества пара, перевернувшего весь мир в прошлом столетии, окончилось; на его место станет неизмеримо более революционная сила — электрическая искра». (К. Маркс). (Из воспоминаний В. Либкнехта).

В. И. Ленин воплотил пророчество К. Маркса в жизнь. «Единственной материальной основой социализма может быть крупная машинная промышленность, способная реорганизовать и земледелие. Но этим общим положением нельзя ограничиться. Его необходимо конкретизировать. Соответствующая уровню новейшей техники и способная реорганизовать земледелие крупная промышленность есть электрификация всей страны». (Ленин). (Собр. соч., изд. 3-е, т. XXVI, стр. 434).

Интересен плакат, изображающий приезд английского писателя Г. Уэллса в Россию, в период, когда поезда были облеплены мешечниками. В своей книге «Россия во мгле» Г. Уэллс говорит об утопичности плана электрификации.

Действующий стенд показывает, почему электрическая энергия является наивысшей формой энергии.

Идея действующей установки — наглядно показать возможность преобразования, концентрации, дробления и управляемости электрической энергии.

Маленькая модель гидрогенератора показывает путь преобразования энергии воды в электроэнергию. Возможность дробимости и концентрации электрической энергии демонстрируется на примере электрических ламп, мощностью от 1 W до современной прожекторной лампы мощностью 15 kW. Управляемость энергетических установок удачно представлена на этом стенде, на действующей схеме из фотореле и тиратрона, которые служат для управления агрегатами. Движение руки, прерывающее луч света, вызывает работу двигателя.

Художественная диаграмма демонстрирует возможность передачи больших мощностей на далекие расстояния. Наглядно показана возможность кольцевания электростанций при передаче электроэнергии.

В небольшом разделе «От патриархальщины к социализму» представлено убогое энергохозяйство дореволюционного периода. Вот полуразвалившееся здание Кузнецкой тэц, такое, каким оно было в 1913 г.

Центральным экспонатом раздела, показывающего зарождение плана ГОЭЛРО, является картина художника Андреева «Ленин и Сталин обсуждают план ГОЭЛРО». Под картиной витрина с фотокопиями заметок и писем В. И. Ленина об электрификации.

Разложены тома плана электрификации отдельных районов России, составленные Государственной Комиссией по электрификации России. Обра-

щает на себя внимание первая книжка по электрификации РСФСР, написанная И. Степановым и снабженная предисловием Н. Ленина (В. И. Ленина).

Среди исторических документов выделяется фотокопия проекта резолюции фракции РКП VIII съезда Советов, написанная на листках блокнота рукой В. И. Ленина.

Представленные документы показывают, какое большое внимание уделял Ленин вопросу популяризации плана ГОЭЛРО среди широких масс населения.

На отдельном щите представлены основные положения плана ГОЭЛРО.

	1913 г.	1920 г.	План ГОЭЛРО
Мощность райэлектростанций в тыс. kW	177	225	1755
Чугун в млн. т.	4,2	0,116	8,2
Сталь в млн. т.	4,2	0,194	6,5
Уголь в млн. т.	29,1	8,7	62,3
Нефть в млн. т.	9,2	3,8	11,8—16,4
Торф в млн. т.	1,7	1,4	16,4

Представленные данные наглядно показывают, что план ГОЭЛРО предусматривал колоссальный для того времени подъем не только энергетического хозяйства, но и топливной базы, а также мощное развитие металлургической промышленности.

Отдельный щит посвящен плану ГОЭЛРО в действии. Показаны фотографии В. И. Ленина и Н. К. Крупской на открытии одной из первых сельскохозяйственных электростанций.

Оперативные телеграммы Ленина о предоставлении топлива электростанциям говорят о внимании, уделявшемся Лениным скорейшему осуществлению плана ГОЭЛРО. Общий вид котельной и машинного зала Каширской электростанции свидетельствует о высокой культуре построенных по плану ГОЭЛРО электростанций.

Рост мощности электростанций в СССР иллюстрируется стремящейся ввысь кривой.

Представленные диаграммы наглядно показывают высокую степень использования электростанций. Так, если к концу 3-й пятилетки установленная мощность электростанций по сравнению с 1913 г. возросла в 16 раз, то за этот же период времени выработка электроэнергии этими станциями выросла в 39 раз.

«Мы используем мощность электростанций в СССР в два раза интенсивнее, чем в буржуазных странах. Можно только радоваться тому, что в такой стране, как СССР, электросвет уже вырвался из сковывавших его рабских пут капитализма и обильно отпускает нам свои блага». (Молотов). [Доклад на XVIII съезде ВКП(б)].

В центре щита находится гравюра — товарищ Сталин на Рионгэсе и представлены неопубликованные снимки С. Орджоникидзе и Л. М. Кагановича на Сталиногорской грэс.

Рост электрификации СССР демонстрируется светящейся картой с автоматическим переключением, представляющей обозревателю выставки различные фазы электрификации нашей страны.

Чудесная карта электрификации увенчана бессмертными словами Ленина «Коммунизм есть Советская власть плюс электрификация всей страны».

Карта включена. Медленно вращается стрелка, указывающая период электрификации. Вот она указывает на 1913 год. На карте вспыхивают едва заметные лампочки в трех городах. Оказываются, к 1913 г. в Ленинграде было 4 электростанции, в Москве — 2 и в Баку — 1.

Но вот лампочки, показывающие состояние электрификации к 1913 г., гаснут и появляется 30 светоточек — это 10 гидроэлектростанций и 20 тепловых электростанций районного значения, общей мощностью 1755 тыс. kW, предусматриваемых строительством по плану ГОЭЛРО, в том числе Днепротэс, Волхов, Свирь, Гизельдон, Шатура, Кашира, Сталиногорская грэс, Ивгрэс, Горгрэс, Кириллэс и др.

Указательная стрелка медленно идет дальше, вот она проходит против 1935 г. В верхнем углу освещается пирамидальная диаграмма, показывающая, что к этому периоду план ГОЭЛРО был перевыполнен в 2½ раза.

Рядом с картой в углублении расположен небольшой экран, на котором демонстрируется диапозитивный фильм (свыше 100 кадров) «20 лет плана ГОЭЛРО».

Дальше представлен стенд итогов электрификации за 20 лет. Наглядные диаграммы показывают, что по мере роста электрификации растет и потребление местных видов топлива.

Участие различных энергоресурсов в общей выработке электроэнергии представляется в следующем виде: так, если в 1913 г. основными видами топлива для электростанций являлись мазут и газ — 60% и высокосортный донской уголь — 40%, то к 1939 г. картина уже резко изменилась — потребление мазута снизилось до 10,4%, а высокосортного угля до 12,7%, зато возросло потребление местного топлива — 23,6% и растет применение водной энергии — 13,6% к общему расходу топлива.

Кривая удельного расхода условного топлива на выработанный kWh на электростанциях НКЭС стремительно падает вниз. Удельный расход условного топлива в kg на выработанный kWh выражается следующими цифрами:

1913 г.	1928 г.	1933 г.	1938 г.	1940 г.
1,06	0,82	0,72	0,614	0,605

Наглядная диаграмма показывает структуру и энергобаланс мощных электростанций. До революции преобладали исключительно конденсаторные электростанции. В настоящее время большое распространение находят тэц. На 100% затраченного топлива конденсаторные электростанции обеспечивали среднюю полезную отдачу не выше 23,5%, тогда как полезная отдача современных тэц в среднем достигает 59,6%.

Быстрый рост мощности тэц НКЭС и количество выработанной ими электроэнергии и тепла также иллюстрируется наглядной диаграммой.

Вместе с ростом строительства электростанций растет и энергетическая промышленность. Так, в 1913 г. максимальная мощность турбогенераторов в отдельных агрегатах достигала 1250 kW, в 1927 г. она повысилась до 10 000 kW, достигнув в 1940 г. — 100 000 kW. Растет также и максимальная мощность трансформаторов, так если еще в 1927 г. предельная мощность трансформа-

торов составляла 1600 kVA, то к 1940 г. она выросла до $3 \times 40\,000$ kVA. Постоянно прогрессирует также и предельная мощность советских гидрогенераторов: в 1927 г. она составляла всего 3675 kW, а к 1940 г. она достигает уже 55 000 kW.

Необычайно выросла и валовая продукция электропромышленности за годы сталинских пятилеток. Наглядно показан рост удельного веса 110—220 kV линий электропередач.

В 1913 г. все линии электропередач были ниже 110 kV; к 1929 г. линий свыше 110 kV насчитывается уже 46%, а к 1940 г. их уже 56%, от всех линий электропередач.

Растет и протяженность линий электропередач. Если принять за 100% длину линий электропередач 20—110 kV, существовавших в 1913 г., то к 1932 г. протяженность линий высоковольтных электропередач составляет 8650%, а к 1940 г. достигает 17 800%.

Подробно представлены типовые проекты и макеты выполненных тэц средней мощности на 25 тыс. kW, проектирование и строительство которых широко развернулось после исторического решения XVIII съезда ВКП(б).

Макет открытой подстанции 110/35 kV мощностью 30 тыс. kW дополняет картину развертывания строительства нового типа электростанций.

Особое место уделено на выставке показу энергогострочительства в третьей пятилетке.

Диаграмма наглядно показывает, как СССР по производству электроэнергии с 15 места в мире вышел на 3 место, уступая по количеству выработанной электроэнергии лишь США и Германии.

Полнота картины от осмотра первого зала дополняется щитом, представляющим перспективный план развития энергетической базы страны. Наглядно показаны решения XVIII съезда ВКП(б) о строительстве 102 тепловых электростанций. Красочно изображен план Большой Волги. Наглядно представлено значение подземной газификации углей.

Экспонаты первого зала завершаются показом лучших стахановцев и ударников электростанций, наряду с показателями их работы.

Второй зал выставки посвящен экспонатам энергетической промышленности и научно-исследовательской работе. Над входом в зал надпись из резолюции XVIII съезда ВКП(б).

«Широко внедрить новейшую энергетическую технику, высокое давление и перегрев пара, применение новейших теплофикационных турбин и автоматизацию основных производственных процессов электростанций и сетевого хозяйства».

В центре внимания посетителя — стенд основных работ ВЭИ. На стенде показаны новые изоляционные лаки: теплостойкие, покровные, химостойкие, огнестойкие и негорючие наполнители — жидкие диэлектрики для взрывобезопасных трансформаторов — совол и совтол. На стенде показаны также тиритовые разрядники.

Видное место занимают безарматурные лампы с внутренним посеребрением, тип которых разработан в светотехнической лаборатории ВЭИ. Краткая надпись сообщает, что при массовом выпуске этого нового типа ламп — до 37% всей выпускаемой продукции — применение нового типа ламп обеспечит экономию электроэнергии, по сравнению с обычными лампами накаливания, в 500 млн. kWh в год. В ближайшее время Москов-

ский электроламповый завод выпустит большую опытную партию этих ламп.

Альбом ВЭИ показывает в сжатой и удобной для обозрения форме ряд основных работ ВЭИ и новых конструкций электрических машин, аппаратов, приборов, магнитных и изоляционных материалов, разработанных за последние 3—4 года и внедряемых в промышленность.

В альбоме представлены 9 разделов: 1. Высоковольтные трансформаторы, 2. Высоковольтные выключатели, 3. Кабели и сети, 4. Защита от перенапряжения, 5. Электроизоляционные материалы, 6. Магнитные материалы, 7. Электрические машины, 8. Электровакуумная техника и светотехника, 9. Автоматика и телемеханика.

Внимание посетителя привлекает макет сечения первого в СССР маслonaполненного кабеля 110 kV, проложенного в Москве в 1940 г.

Действующая модель буровой машины для механизации работ по рытью котлованов для высоковольтных опор обеспечивает изготовление ям, глубиной 2 м при диаметре 0,7 м.

На стенде измерительных приборов всеобщее внимание привлекают миниатюрные лабораторные стрелочные приборы I класса, изготовленные Ленэнерго в виде набора для схемы Арона.

Индукционная установка с высококачественным генератором тональной частоты позволяет отыскивать быстро и надежно трассу подземного кабеля и определять место его повреждения.

Интересен новый мост Шеринга, построенный лабораторией Мосэнерго на рабочее напряжение 60 kV, предназначенный для монтажа в автомобиле техпомощи и позволяющий работать оператору без защитной клетки.

Ряд высоковольтных штанг позволяет производить замеры и некоторые работы на линии 220 kV. Интересны штанги для проверки качества изоляторов и состояния соединения проводов, по методу падения напряжения и методом термопар. Весьма интересна радиоустановка с рамочной антенной, позволяющая быстро и надежно устанавливать наличие дефектных изоляторов в гирлянде не залезая на мачту.

Внимание посетителей привлекает действующая модель безредукторного электропривода системы инж. П. А. Фридкина к шаромельницам.

Действующая телемеханическая установка позволяет по двум проводам управлять работой электростанций и подстанций, без обслуживающего персонала, из центрального диспетчерского пункта. Эта же установка обеспечивает возможность телеизмерения и суммирования показаний приборов, с одновременной передачей измеряемых величин на указательный прибор диспетчера. На щите светящаяся мнемоническая схема показывает диспетчеру состояние всей управляемой диспетчером энергетической системы в целом. Телемеханическая установка изготовлена ЦЛЭМ — Мосэнерго.

Интерес представляет манометр с фотоэлементом, служащий для дистанционной передачи минимального и максимального пределов заданной регулировки машинисту.

Образцы низкосортных топлив с их характеристикой и действующая схема парового котла со ступенчатым испарением высокого давления до 300 kg/cm² при 600° С, системы инж. Э. И. Рома завершают промышленный отдел выставки.

Третий нижний зал выставки содержит витрины с энергетической литературой, издаваемой Госэнергоиздатом. Экспонируются книги, учебные плакаты, плакаты по технике безопасности и периодические издания. Среди экспонируемых журналов — юбилейный номер журнала «Электричество».

Покидая выставку, посетитель уходит с сознанием грандиозной работы, проделанной в СССР области электрификации страны, и с чувством горького удовлетворения, что ему выпало участвовать в великую сталинскую эпоху побед социализма.

БИБЛИОГРАФИЯ

ИОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

БУТАЕВ Ф. И., ПАНТЮШЕВ Г. С., ЭТТИНГЕР Е. Л. Регулируемый электропривод с управляемыми выпрямителями. М. Госэнергоиздат. 1940, 176 стр., 124 илл. (Труды Всесоюзного электротехнического ин-та. Вып. 39). 1500 экз., ц. 6 р. 65 к.

ЯНЧУК Г. М. Регулирование скорости и реверсирование двигателей постоянного тока в установках с управляемым выпрямителем. Харьков—Москва. Гостоптехиздат. 1940. 46 стр., 29 илл. (Труды Донецкого индустриального ин-та, г. Сталино, Донбасс, 1940) 600 экз. Бесплатно¹.

Ионные выпрямители для питания регулируемого электропривода стали применяться по существу лишь в последнее десятилетие. Этим и объясняется то обстоятельство, что, при наличии ряда русских и иностранных книг собственно по выпрямителям, отсутствуют книги, посвященные непосредственно вопросам работы электропривода с регулируемым посредством ионных аппаратов (ионного электропривода). Рецензируемая книга трех авторов и брошюра Г. М. Янчука по сути являются первыми книжными работами на эту тему.

Обе они в первую очередь освещают те научные исследования, которые велись авторами во Всесоюзном электротехническом и Донецком индустриальном институтах. Это обстоятельство придавало обоим книгам своеобразный характер, не вполне соответствующий их наименованию.

Во-первых, авторы рассматривают лишь один тип управляемых выпрямителей — ртутные выпрямители. В книгах совершенно ничего не сказано о другом типе выпрямителей, нашедшем широкое применение в зарубежной практике для разнообразных условий привода, — о тиратронах. Также не рассмотрен привод от игнайтронов, между тем как на игнайтроны теперь имеется даже проект всесоюзного стандарта.

В ряде случаев игнайтроны, вероятно, вытеснят ртутные выпрямители ввиду недостатков последних, в отношении обратного зажигания.

Во-вторых, в книгах, посвященных регулируемому электроприводу, есть основания найти хотя бы краткий материал, касающийся переходных режимов ионного привода, если понимать под приводом не только питающий выпрямительный агрегат, но и двигатель, вращающий исполнительный механизм.

Переходные режимы питаемого, таким образом, двигателя имеют свою специфику. Изучение их стоит в порядке дня. Между тем никаких расчетных указаний по вопросу о переходных режимах электропривода в книгах нет.

Авторы книг занимались в ВЭИ почти исключительно исследованиями схем ртутных выпрямителей, их усовершенствованием, и в работах нашли отражение именно все соответствующие материалы, частично опубликованные ими ранее в отдельных статьях и докладах. Эти обстоятельства придали книгам схемно-физический характер, в котором центр тяжести перенесен на ртутные выпрямители и осуществление схем для нескольких режимов работы электропривода. Динамика электропривода в специфических условиях его питания от ионных аппаратов не нашла освещения.

Приведенные два принципиальных замечания ни в какой мере не снижают качество первой более полной книги Ф. И. Бутаева, Г. С. Пантюшева и Е. Л. Эттингера.

Книга состоит из трех частей и 13 глав. Половина ее посвящена рассмотрению основных вопросов теории управляемых выпрямителей, питающих машину постоянного тока. Дав краткую характеристику работы неуправляемого выпрямителя, авторы подробно рассматривают физику процессов

управляемого выпрямителя, описывая различные способы точного управления и работу ртутного агрегата в выпрямительном и инверторном режимах. Отсюда как следствие вытекают схемы питания нереверсивного и реверсивного привода ртутными выпрямителями. Далее рассматриваются механические характеристики в разных схемах и дается расчет прерывистых токов. Весьма подробно освещены исключительно важные для практики вопросы компаундирования и защиты. Рассматривается целый ряд возможных способов компаундирования. Все варианты иллюстрируются богатым опытом материалом в виде характеристик, полученных в лаборатории ВЭИ.

Авторы базируются лишь на материалах ВЭИ, поэтому в книге совершенно не нашли отражения способы получения экскаваторной характеристики, могущей иметь значение во всех тех случаях, где ныне применяется трехобмоточный генератор Леонарда. Подобные схемы были исследованы экспериментально в лаборатории электропривода ЛИИ с использованием тиратронов.

Подробно освещен вопрос о получаемом в схемах ионного привода коэффициенте мощности. Выводы также иллюстрируются опытным материалом. Первая часть заканчивается кратким сопоставлением к. п. д. агрегата Леонарда и к. п. д. агрегата со ртутным выпрямителем. Сопоставление системы Леонарда и системы ионного привода в отношении характера протекания переходных режимов в книге не дано.

Во второй части дается общий обзор различных схем. Практического материала в иностранных журналах по этому вопросу почти нет. Авторы, дав общее описание процессов работы и управления в наиболее типичных случаях, сосредоточили свое внимание на описании схем, разработанных в ВЭИ, одной — применительно к шахтному подъемнику, второй — для реверсивного прокатного стана. Приведенные схемы пока что являются теоретическими. Для окончательного суждения необходимо иметь материалы о результатах пробной эксплуатации на полупромышленных установках. Опыт должен выявить возможные дефекты схемы и показать направление дальнейшего улучшения. Это улучшение будет зависеть также от успешности дальнейшей исследовательской работы над игнайтронами.

При разработке схем шахтного подъема реверсивного прокатного стана использованы некоторые типичные узловые схемы этих электроприводов с контактной автоматикой.

Заключительная третья часть книги посвящена физическим процессам бесколлекторных вентильных двигателей и рассмотрению преобразователей частоты, в том числе схемы, разработанной Ф. И. Бутаевым. Материал изложен физически вполне ясно и сопровождается некоторым количеством осциллограмм и рядом экспериментальных данных. Авторы совершенно не касаются больших работ, проведенных по вентильному двигателю и ионному преобразователю частоты в Ленинградском политехническом институте под руководством проф. Завалишина. На основании последних работ можно было бы привести ряд интересных данных, в частности, относящихся к режиму работы привода с асинхронным двигателем при переменной частоте, получаемой от ионных преобразователей.

¹ Рецензия представлена Гос. научной библиотекой.

В целом необходимо отметить, что выпущенная книга имеет большое значение для широкой пропаганды идей ионного привода в технических кругах. Книга поможет многим техникам овладеть физикой процессов выпрямления. Написана книга простым и ясным языком. Понимание разобранных в ней физических процессов не представляет трудности. Книга может быть рекомендована в качестве вспомогательного пособия во втузах при прохождении курсов применения ионных и электронных аппаратов для целей электропривода.

Нужно лишь пожалеть, что большие работы, выполненные в рассматриваемой области ВЭИ, пока не нашли реального применения в промышленности.

Вторая рецензируемая книга представляет собой труды Донецкого индустриального института. Она имеет много об-

щих черт с первой книгой вследствие того, что экспериментальная часть, нашедшая отражение в брошюре, выполнялась Г. М. Янчуком совместно с авторами первой книги в ВЭИ. В книге Г. М. Янчука разбираются основные физические процессы, происходящие в ионном электроприводе постоянного тока. В большей своей части брошюра является повторением первой части более полной книги трех авторов, несколько большее внимание в брошюре уделено механическим характеристикам двигателя. Однако переходные режимы ионного электропривода не затронуты и в ней. Как и первая книга, книга Г. М. Янчука должна сыграть пропагандирующую и частично учебную роль в деле внедрения ионного электропривода.

Д-р техн. наук, проф. В. К. ПОПОВ
Ленинградский политехнический институт им. Калинина

ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОДСТАНЦИИ

Н. КОСТРОМИТИН, В. БОРОВИКОВ, И. РЫШКОВСКИЙ. Тяговые подстанции. Под редакцией д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Костромитина. Трансжелдориздат. Москва, стр. 483, 1940, тираж 3000 экз. цена 17 руб.

Авторами рассматриваемой книги являются преподаватели Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта.

По мысли составителей, книга рассчитана на инженерно-технический состав, работающий по проектированию, монтажу и эксплуатации электротяговых подстанций, т. е. на вполне квалифицированного читателя.

Весь материал книги разбит на следующие тринадцать глав, которым предпослано небольшое введение.

I — токи короткого замыкания; *II* — аппаратура распределительных устройств на стороне переменного тока; *III* — защита от сверхтоков и перенапряжений; *IV* — заземляющие устройства; *V* — схемы распределительных устройств подстанций высокого напряжения; *VI* — типы распределительных устройств переменного тока и их элементы; *VII* — преобразовательные агрегаты тяговых подстанций; *VIII* — распределительное устройство постоянного тока; *IX* — подстанции с ртутными выпрямителями; *X* — подстанции с мотор-генераторами; *XI* — устройство, монтаж и эксплуатация тяговых подстанций; *XII* — автоматические тяговые подстанции; *XIII* — прочие типы тяговых подстанций.

Главы *I—VI* написаны В. А. Боровиковым, главы *VII* и *XIII* — Н. Н. Костромитиным. Главу *XII* составил И. Я. Рышковский, а главы *VIII, IX, X* и *XI* — совместная работа Н. Н. Костромитина и И. Я. Рышковского.

Хотя авторы в своем кратком предисловии совершенно резонно обещают «не дублировать» рассмотрение вопросов, относящихся вообще к подстанциям, и «осветить те элементы оборудования тяговых подстанций, которые менее других затронуты в нашей литературе» (подчеркнуто мною Г. Ц.), однако это свое обещание составители далеко не выполнили, чем значительно умилили достоинства книги.

С этой точки зрения главы *I—VI*, посвященные общим вопросам проектирования и строительства районных трансформаторных подстанций, являются более или менее удачной компиляцией. Весьма сомнительно, чтобы какой-либо проектировщик в своей повседневной работе пользовался материалом этих глав, например, при выборе защиты преобразователей или при расчете токов короткого замыкания. Наоборот, не подлежит сомнению, что наш проектировщик обратится к первоисточникам, руководящим указаниям и прочему справочному материалу. Такое же отношение к указанным главам будет и у инженера-эксплуатационника.

Для иллюстрации сказанного достаточно обратиться к главам *II* и *III*. В третьей главе настолько обобщенно изложена релейная защита, что читателю, интересующемуся специфическими вопросами защиты преобразовательных агрегатов невозможно в тексте найти и крупную конкретную сведений. А ведь не секрет, что выбор рациональной защиты на стороне переменного тока ртутного выпрямителя далеко еще не решенная задача, между тем автор этот вопрос попросту обошел. Равным образом совершенно ничего не сказано о защите синхронных двигателей, защита которых требует модернизации. Наоборот, непропорционально много места занимает защита линий и сетей, имеющих весьма отдаленное касательство к теме книги. Большая же часть текста третьей главы уделена описанию и теории широко

распространенных и частично уже устаревших реле Харьковского электромеханического завода.

Недоумение вызывают главы *V* и *VI* как по своему содержанию, так и по построению. В этих главах роль идет о крупных районных трансформаторных и фидерных подстанциях. Только иногда, вскользь, упоминается о тяговых подстанциях. Правда, каждая тяговая подстанция есть в конце концов понизительная подстанция, но в задачи рецензируемой книги не должно входить описание мощных распределительных устройств переменного тока (см. §§ 4, 5 и далее главы *V*). В этом разделе книги надо было сконцентрировать внимание читателя на особенностях, присущим устройствам переменного тока тяговых подстанций. В этих же главах встречаются элементарные сведения хорошо известные из школьных программ, как например, примитивная теория работы свинцового аккумулятора (стр. 220). Недопустимо, когда автор предлагает для питания собственных нужд подстанций пользоваться трансформатором 220/110 В, между тем, как давно уже рекомендовано напряжение 380/220 В (стр. 218).

Наибольший интерес представляет вторая половина книги, посвященная собственно тяговым подстанциям, их схемам и оборудованию.

Авторы наглядно, на примере конкретных цифр доказывают безусловное преимущество ртутных выпрямителей по сравнению с мотор-генераторами, которые даже на электрифицированных участках с горным профилем себя совершенно не оправдали. На стр. 270—276 Н. Костромитин излагает свою оригинальную теорию годового к. п. д. преобразовательного агрегата. Далее обобщается опыт исследовательских работ, проведенных авторами на тяговых подстанциях по определению перегрузочной способности преобразователей. Необходимо подчеркнуть, что рекомендуемые авторами величины перегрузки мотор-генераторов и ртутных выпрямителей не обоснованы солидными экспериментальными данными.

В восьмой главе о распределительных устройствах постоянного тока наиболее полно разработаны вопросы защиты подстанций и контактной сети быстродействующими выключателями. Особенную ценность (правда, теоретическую) представляет впервые так подробно изложенная в нашей литературе теория индуктивного шунта (стр. 325—330); там же приведены вычисленные кривые, хорошо иллюстрирующие работу автомата с индуктивным шунтом. Можно только пожалеть, что формула 112 на странице 328 не развита далее и не получено аналитически выражение для времени, в течение которого ток в выключающей петле достигает максимума.

Однако в этом разделе имеются некоторые неточности и упущения, которые следует отметить. Во-первых, не дана четкая классификация быстродействующих выключателей. Разделение на выключатели прямого и обратного тока технически неправильно и может вызвать путаницу (стр. 291). На стр. 295 и далее не дано понятие о поляризованных и неполяризованных автоматах. При описании самого распространенного в Союзе автомата типа IR не упомянуто о выключающей катушке и о схемах включения. Тут же надо было отметить большую зависимость величины установившихся

автоматов от напряжения аккумуляторной батареи, а также большие трудности, связанные с их регулированием.

При чтении описания автомата системы В. Крапивина создается впечатление, что отключение происходит под действием мощной пружины. На самом же деле отличительной особенностью этих выключателей является принцип электромагнитного отключения.

Авторы уделили внимание также новому автомату системы Голубева: желательнее было бы осветить опыт эксплуатации этих аппаратов.

Ценность главы VIII значительно повысилась бы, если бы авторы отвели место измерениям тока, напряжения и электрической энергии в цепях высокого напряжения постоянного тока, а также осветили детальнее способы борьбы с блуждающими токами.

В главах IX—XI в весьма сжатой форме освещены схемы и устройство преобразовательных подстанций для электрической тяги. Местами авторы допускают излишнее упрощение, например, при пояснении сущности однолинейных, трехлинейных, монтажных схем и т. п. (стр. 332). Сведения о монтаже и эксплуатации носят справочный характер. К со-

жалению, в этих главах поверхностно затронуты вопросы техники безопасности, которые вообще слабо освещены в литературе и преобразователях.

В главе XII доказываются весьма убедительно преимущества автоматических подстанций. Можно только присоединиться к И. Рышковскому, когда он на стр. 424 пишет, что «...до сих пор приходится констатировать игнорирование дела автоматизации тяговых подстанций. Объясняется это, с одной стороны, робостью и консерватизмом, с другой,—незнанием тех преимуществ и выгод, которые сулит автоматизация».

В главе XIII приводятся краткие сведения о передвижных и подземных тяговых подстанциях.

Резюмируя, следует еще раз указать, что ценность книги заключается во второй ее части, посвященной собственно преобразовательным установкам. Эта часть книги будет полезна и работникам крупных преобразовательных подстанций, предназначенных для питания электролизных производств.

Инж. Г. К. ЦВЕРАВА

НОВЫЕ КНИГИ

Зейлидзон Е. Д. Релейная защита. Современная релейная защита высоковольтных сетей. Конспект лекций, читанн. в Институте в 1939—1940 гг. М., Всесоюз. научное инж.-техн. о-во энергетики. Институт усовершенствования по энергетике, автоматике и связи, 1940, 120 стр. с иллюстр. и чертеж. Изд. подписное.

Квест В. Ф. Станционные аккумуляторные батареи поверхностно-коробчатого класса. Правила ухода. М.—Л. Гостоптехиздат, 1940, 36 стр. с иллюстр. и чертеж. (Ленингр. аккумуляторн. завод «Ленинская Искра»). Цена 2 р. 50 к., перепл. 1 р. 25 к.

Китаев Е. В. и Гревцов Н. Ф. Курс электротехники. М., Оборонгиз, 1940. 519 стр. с иллюстр. и чертеж. Цена 16 руб.

Кронгауз Ю. С. Мощные трансформаторы с регулируемым под нагрузкой напряжением. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 54 стр. с иллюстр. и чертеж. (Оргкомитет конференции по трансформаторостроению). Без цены.

Михайлов В. А. Применение электронных приборов в промышленной автоматике. Т. 2. Конспект лекций, прочитанн. в Ин-те в 1939—1940 уч. году. М., Ин-т усовершенствования по энергетике, автоматике и связи, 1940, 120 стр. с иллюстр. и чертеж. Без цены.

Михельсон В. А. Физика. Изд. 10, полностью переработ. Под общ. ред. Н. Д. Папалекси. Допущено ВКВШ в качестве учебника для студентов высш. техн. учебн. заведений. Т. 2. «Электричество». Оптика. М.—Л. Гостехиздат, 1940, 656 стр., с иллюстр. и чертеж. Цена 13 р. 60 к.

Поляк Н. А. Повреждения и неисправности статора паротурбинного генератора. (Турбин. генераторы в эксплуатации, вып. III). М.—Л. Госэнергоиздат, 1940, 96 стр. с иллюстр. и чертеж. Цена 3 р. 50 к.

Ремонт электроизмерительных приборов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 99 стр. с иллюстр. и чертеж. Цена 3 р. 60 к.

Сиротинский Л. И., Ломоносов В. Ю. и др. Техника высоких напряжений. Под ред. Л. И. Сиротинского. Утв. КВШ в качестве учебника для энергетич. вузов и электротехнич. фак-тов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, Вып. 1, 352 стр. с иллюстр. и чертеж. Цена 10 р. 75 к.

Тайц А. А. Устройства для улучшения коэффициента мощности в районных сетях. Конспект лекций, прочитанных в 1939—1940 уч. году. М. Всес. научн. инж.-техн. об-во энергетики и электросвязи. Ин-т усовершенствования по энергетике, автоматике и связи, 1940, 82 стр. с иллюстр. и чертеж. Изд. подписное.

Тайц А. А. Экономия электроэнергии. Л. Всес. научн. инж.-техн. о-во энергетики и электросвязи. Ин-т усовершенствования по энергетике, автоматике и связи, 1940, 88 стр. с иллюстр. и чертеж. Изд. подписное.

Тезисы и конспекты докладов на научном совещании по теории регулирования (Отв. ред. В. С. Кулебакин). М.—Л. Изд-во Акад. Наук СССР, 1940, 242 стр. с чертеж. (Отд. техн. наук АН СССР). Без цены. (Литограф. изд.).

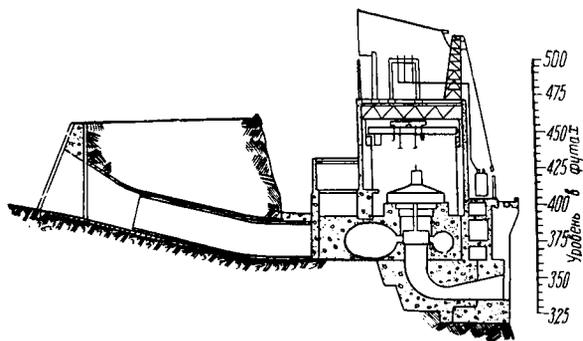
Электрические машины минимального веса. По материалам Совещ. секции электромеханики (Отв. ред. К. И. Шенфер). М.—Л., Изд-во Акад. Наук СССР, 48 стр., 1940 (Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского). Цена 4 руб.

ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

A. Fraps. Сооружение мощной гЭС при плотине Паркер.
Civil Eng., стр. 634—637, № 10, 1940.

Плотина Паркер построена в 1938 г. в связи с проведением гигантского акведука, который служит для водоснабжения района г. Лос-Анжелос (США), находящегося в 430 км от р. Колорадо.

В связи с последними засушливыми годами быстрый рост электропотребления, главным образом со стороны станций машинного орошения, заставляет осуществить энергетическую часть проекта в крайне короткие сроки. В первую очередь устанавливается 3 вертикальных гидравлических турбины Френсиса мощностью 40 000 л. с., 94,7 об/мин. Напор на турбинах при расходе воды через плотину 141,5 м³/сек составляет 21,3 м. При напорах от 21,3 до 24,4 м к. п. д. турбины составляет 90%. По своим геометрическим размерам эти спиральные машины крупнее турбин гЭС Болдер-Дам. Турбины непосредственно соединены с трехфазными генераторами мощностью 30 MVA, 6,9 kV, 60 Hz. Для генераторов гарантирован к. п. д. 97,2% при полной нагрузке



Поперечный разрез гЭС Паркер

и $\cos \varphi = 1$. В машинном зале устанавливается мостовой кран грузоподъемностью 200 т.

В настоящее время к плотине Паркер (см. рисунок) электрическая энергия подается от гЭС Болдер-Дам по линии передачи, обслуживавшей в свое время строительство акведука и плотины. Поэтому еще до окончания сооружения гЭС Паркер от последней проведена линия передачи в орошаемую долину Солёной Реки в район г. Феникс. Параметры этой трехфазной линии, выполненной на деревянных опорах, следующие: длина 420 км, напряжение 161 kV, частота 60 Hz; применен полый медный кабель сечением 152 мм². Ввиду необычайно тяжелых грузовых условий, по всей трассе предусмотрены два стальных грозозащитных троса диаметром 9,55 мм и два медных противовеса диаметром 6,35 мм, проложенных под землей на глубине 60 см. Грозозащитные тросы соединены с противовесом на каждой опоре. Сооружение линии плотина Паркер г. Феникс было начато в августе 1939 г. и закончено в конце января 1940 г. Линия высокого напряжения в настоящее время передает в район г. Феникса 20 MVA от гЭС Болдер-Дам при пониженном напряжении 66 kV. Строительство линии было очень широко механизировано.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ

Мощные гидрогенераторы для гЭС в Манчжоуго.
VDI—Zeitschr. Bd. 84, стр. 829, № 43, 1940.

Вблизи г. Кирина (Манчжоуго) сооружается мощная гидроэлектрическая установка, использующая от 52 до 69 т падения р. Сунгари, притока р. Амура. При полном развитии гЭС будет располагать 8 главными агрегатами. В первую очередь устанавливаются 3 вертикальных водных турбины Френсиса по 115 500 л. с., делающих 125 об/мин. Подпятник агрегата рассчитан на нагрузку 1160 т (из которых вес рото-

ра генератора составляет 400 т и вес рабочего колеса турбины — 55 т). Диаметр рабочего колеса, отлитого из стали, — 4,6 м. Диаметр турбинного вала равен 950 мм, а вес его — 30 т. Механизм регулирования рассчитан на работу 32 000 кгм. Гидрогенератор зонтичного типа имеет мощность 70 MVA при $\cos \varphi = 0,85$ и напряжении 13,8 kV. Коэффициент полезного действия при полной нагрузке составляет 96,8%. При разгонном числе оборотов (275 об/мин) окружная скорость полюсных наконечников составляет 100 м/сек. При этом центробежная сила для каждого из 48 полюсов достигает 350 т. Общий вес гидрогенератора составляет 800 т. Внешний диаметр сварного статора — 11,9 м, а диаметр его отверстия — 7,5 м. Стержневая обмотка статора особой конструкции состоит из 684 стержней. При работе генератора магнитное поле ротора вызывает в статоре вращающее усилие в 650 т. Возбудитель имеет мощность 500 kW. Остановка ротора осуществляется в течение 4 мин с помощью 8 мощных пневматических тормозов, действующих под давлением 12 ат. Цилиндры этих тормозов, при нагнетании в них масла при 125 ат, служат также для подъема ротора в процессе монтажа. Предусмотрены специальные водяные охладители масла подпятника и охлаждающего воздуха. В зимнее время после длительной остановки агрегата остывшее масло подогревается до 20° с помощью особого нагревательного устройства.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ

Оригинальное решение использования энергии рек Сэнти и Купер.
Eng. News Record, стр. 42—45, № 21, 1940.

В штате Южная Каролина (США) с 1938 г. осуществляется интересная комплексная схема, предусматривающая объединенное использование двух рек Сэнти и Купер в целях электроэнергетики и транспорта.

На р. Сэнти сооружается земляная плотина высотой 13,4 м, длина которой достигает 13 км. Из водохранилища, образованного этой плотинной по каналу длиной 12 км, вода подается во второй резервуар регулирования, который создается в соседнем бассейне р. Купер, посредством земляной плотины Пинополис высотой 22,5 м. Непосредственно при плотине Пинополис сооружается гЭС, напор которой составляет в среднем 21,4 м.

В здании гЭС устанавливается 5 главных вертикальных агрегатов, состоящих из пропеллерной турбины мощностью 40 тыс. л. с., которая приводит в действие трехфазный зонтичный гидрогенератор мощностью 34 MVA, 13,8 kV, $\cos \varphi = 0,96$ Hz.

Полная проектная мощность гЭС достигает 213,3 тыс. л. с., при мощности 5 агрегатов первой очереди 173,3 тыс. л. с.

ГЭС начнет работать в 1941 г.

Представляет интерес отметить, что почти 150 лет тому назад (1793—1800) на указанной трассе был сооружен и эксплуатировался шлюзованный судоходный путь, бездействующий, однако, с 1851 г. в результате появившейся конкуренции железных дорог.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ

W. G. Fielder. Модернизация небольшой гидроэлектростанции, проработавшей 40 лет.
El. World, стр. 67—69, № 10, 1940.

Недавно в США произведена реконструкция устаревшей гЭС High Falls, ранее располагавшей двумя агрегатами по 400 kW, которые были установлены в двух отдельных зданиях, оборудованных двухфазными генераторами и сильно изношенными водяными турбинами.

Модернизация заключалась в капитальном ремонте плотины и одного из зданий гЭС, а также в углублении отводящего канала. Вновь установлена одна горизонтальная турбина Френсиса мощностью 1400 л. с., непосредственно соединенная с трехфазным генератором мощностью 1000 kW, $\cos \varphi = 0,8$, 2,4 kV, 60 Hz. ГЭС полностью автоматизирована. Режим гЭС нормально регулируется от поплавкового механизма, установленного в верхнем бьефе. ГЭС обычно работает в условиях оптимального к. п. д. агрегата до тех пор, пока горизонт воды не снизится на 30 см, после чего генератор начинает

работать как синхронный двигатель при закрытой турбине со всасывающей трубой, заполненной воздухом. В случае снижения частоты системы, гЭС вступает в работу вне зависимости от уровня воды в пруде и продолжает работать до восстановления нормальной частоты или до предельно возможной сработки верхнего бьефа. Эта особенность работы установки объясняется тем, что гЭС High Falls (совместно с двумя другими электростанциями) питает сравнительно небольшую группу потребителей, соединенных с главной системой одиночной линией, авария на которой может оставить без электроэнергии ряд небольших городов. Сравнительно несложная реконструкция гЭС High Falls позволила сохранить в системе электростанцию мощностью 1000 kW с годовой выработкой 6500 MWh.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ

ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Повреждения электрических сетей от бомбардировок. *El. World, стр. 6 (1236), № 17, 1940.*

Журнал перепечатывает из «Electrical Review» от 7 сентября 1940 г. статью о повреждениях, наносимых электрическим сетям воздушными бомбардировками, отмечая в подзаголовке, что эти повреждения оказались большими, чем ожидалось. Наиболее часто повреждаются провода воздушных линий. При этом сечение провода не играет роли. Провода рвутся осколками, либо обломками камней от взрыва фугасной бомбы весом 45 kg на расстоянии 90 м от линии. В одном из случаев на двухцепной линии 33 kV с проводами сечением по 62,5 mm² несколько проводов были сброшены с семи пролетов от взрыва бомбы весом 450 kg на расстоянии 110 м.

Низковольтные линии больше страдают от обломков рушащихся зданий, чем от осколков бомб. Нет никаких фактов, указывающих на то, что воздушная волна от взрыва бомбы вызывает какие-либо повреждения кроме возможного перегорания предохранителей высокого напряжения. Зажигательные бомбы, наполненные нефтью, в ряде случаев пережигают провода. От воронки бомбы горящая нефть разбрызгивается на расстояние 6 м и может пережечь медный провод сечением до 38,5 mm².

Медные провода по сравнению с алюминиевыми меньше повреждаются повреждениями и их легче и дешевле ремонтировать. Было найдено возможным соединять разорванные сталеалюминиевые провода конусными зажимами, сохраняя ту же стрелу провеса. Это делалось на больших пролетах даже в тех случаях, когда промежуточная траверса была повреждена из-за одностороннего тяжения.

Деревянные опоры не имели большого числа повреждений, несмотря на их очевидную непрочность при обрыве одного или нескольких проводов. Зарегистрирован случай, когда осколок площадью около 15 см² при взрыве фугасной бомбы на расстоянии 45 м, прошел насквозь через деревянную опору толщиной 18,7 см на расстоянии 60 см от верхушки. Сведений о том, что опоры падали от взрыва бомб, не поступало. Наоборот, сообщалось, что взрыв бомбы малого калибра на расстоянии 0,3 м от основания А-образной опоры не повредил ни последнюю, ни линию, укрепленную на ней.

Случаев повреждения железных мачт зарегистрировано мало. Главным образом осколками перебиваются части конструкции.

Линии, в которых провода были соединены вязкой с петлей, восстанавливались гораздо скорее, чем обычные, так как в этом случае при обрыве провода промежуточный изолятор не перегружался, и опора оставалась целой. Этот тип соединения применялся на одноцепных линиях 11 kV с А-образными опорами и проводом сечением 62,5 mm².

На основании опыта восстановления линий передач авторы считают, что воздушные бомбардировки не смогут заметно нарушить электроснабжение страны (статья написана до начала массовых воздушных налетов на Англию. И. Б.).

Инж. И. А. БУДЗКО

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

W. Hamacher. 50 лет Rhätische Bahn. *Verkehrstechnik, стр. 286, Heft 19, 1940.*

Rhätische Bahn занимает одно из видных мест среди узкоколейных дорог мира и играет вместе с основной железнодорожной артерией Bundesbahnen крупную роль в пассажироперевозках Швейцарии.

Недавно исполнилось 50 лет со дня основания Rhätische Bahn. Открытие первого участка этой дороги Landquart—Kloster—Davos состоялось 9 октября 1889 г.

По случаю исполнившегося юбилея дирекцией Rhätische Bahn был выпущен сборник «Fünfzig Jahre Rhätische Bahn, Festschrift 1889—1939».

Швейцарский кантон Graubünden, расположенный в юго-восточной части Швейцарии, пересекается более чем 100 доллинами, обеспечивающими удобное сообщение с севера на юг. Несмотря на разрешение проблемы пересечения Альп в Сен-Готтардском направлении, Rhätische Bahn не потеряла своего значения как железная дорога местного значения, играющая, в частности, большую роль для зимнего спорта и туризма.

К 1913 г. общая протяженность линий Rhätische Bahn достигла 276 km. Начиная с 1913 г., в связи с резко ощущаемым недостатком угля в стране, начатся перевод отдельных участков Rhätische Bahn на электрическую тягу. Первым был электрифицирован участок Thusis—St. Moritz. Полная электрификация Rhätische Bahn была завершена к 1922 г.

Максимальные пики пассажироперевозок на Rhätische Bahn относятся к 1937—1938 гг. и достигают 55 млн. пассажирокилометров в год.

Rhätische Bahn характерна в первую очередь очень тяжелым гористым профилем; подъемы на отдельных участках дороги достигают 45‰. Дорога электрифицирована на однофазном переменном токе 16²/₃ Hz при напряжении 11 kV в контактных проводах и обслуживается электровозами мощностью от 600 до 1200 л. с.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

K. Schöber. 75 лет венских городских железных дорог. *Verkehrstechnik, стр. 307—310, Heft 21, 1940.*

В 1865 г., с открытием эксплуатации на участке Schottenring—Hernals протяжением 3,5 km, в Вене началась регулярная эксплуатация городских конных железных дорог.

Перевод городских железных дорог на электрическую тягу произошел не сразу и значительно позже, чем в других крупных городах мира. Сначала в 1879 г. появляется паровоз, и в дальнейшем на паровую тягу переоборудуются значительное число линий конки.

Лишь только в 1894 г. начинаются первые попытки введения электрической тяги в Вене. Первые венские городские электрические железные дороги эксплуатировались на аккумуляторной тяге.

Опытная линия электрического трамвая с питанием от контактного провода была оборудована значительно позже — 28 января 1897 г. на участке Prater—Remise—Wallgasse (9,4 km). Рабочее напряжение составляло 500 V. Двухосный моторный вагон был оборудован двумя тяговыми двигателями мощностью по 20 л. с. каждый.

С 1903 г. городские железные дороги Вены переходят в ведение муниципалитета, и с 27 июня 1903 г. конка окончательно прекращает свое существование. Паровая тяга еще долго конкурировала с электрической. Паровая тяга в Вене была совсем вытеснена электрическим трамваем лишь только в 1922 г.

В настоящее время венский трамвай обладает широко разветвленной сетью. Протяженность муниципальных линий достигает 287,5 km¹ при подвижном составе 1510 моторных вагонов и 1782 прицепных.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

K. Wiesinger. Скоростной рельсовый транспорт. *ETZ, стр. 907—908, Heft 40, 1940.*

Повышение скорости рельсового транспорта может быть достигнуто путем применения электрической тяги с сохранением существующего верхнего строения пути, но с прокладкой четырехпутных магистралей с большими радиусами закругления. На таких магистралах максимальная скорость может быть повышена с 160 до 200 km/h.

При разработке проблемы рельсового скоростного транспорта автор реферлируемой статьи предостерегает от ошибки, допущенной при переходе от почтовой кареты к рельсовому транспорту и считает необходимым разработать единую нормальную международную ширину колеи для новых скоростных железных дорог.

Для скоростей в 300 km/h и выше автор считает весьма эффективным применение скоростных электрических подвесных и эстакадных железных дорог. Рекомендуется широкое использование авиационного опыта при создании благоприятных, в аэродинамическом отношении, форм подвижного состава с широким применением подвижного состава пропеллерного

¹ По данным „Passenger Transport Journal—Year Book“, 1940.

типа. Однако наряду с этим автор отмечает большие преимущества подвижного состава с колесным приводом, заключающиеся в большей емкости, меньшем профиле, большей устойчивости вследствие низкого расположения центра тяжести и меньшем сопротивлении воздуха. Автор указывает на особое преимущество скоростных эстакадных железных дорог, заключающееся, в частности, в значительном снижении давления на ось (6 t против обычных 22 t на наземных железных дорогах). Эстакадная дорога обеспечивает, помимо того, свободное наземное движение других видов транспорта.

Расход энергии сверхскоростных электрических железных дорог, несмотря на трехкратное повышение скорости, составляет всего $\frac{2}{3}$ от расхода энергии подвижного состава существующего типа. Явление это объясняется, главным образом, специальной облегченной конструкцией подвижного состава, а также уменьшением сопротивления воздуха эстакадных железных дорог по сравнению с наземными.

При применении электрической сигнализации и блокировки, частота движения сверхскоростных поездов может быть доведена до 6 мин, при этом провозная способность при четырехвагонных составах определяется в 6000 пассажиров в час.

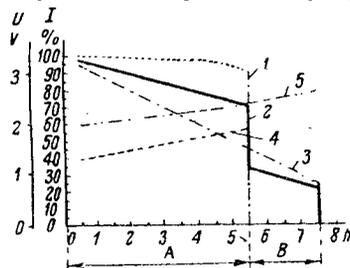
Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

G. F. Rueg. Современные зарядные станции для электромобилей и электрокар. *Bull. ASE*, стр. 487—492, № 21, 1940.

В настоящее время потребность Швейцарии в электроподвижном составе, обслуживающем торговые предприятия, почту и внутризаводские перевозки, составляет от 6000 до 8000 электрокар и электромобилей. Рост парка электрокар вызывает необходимость в развитии зарядных станций, обеспечивающих возможность заряда различных типов аккумуляторных батарей.

Для электрокар применяются свинцовые батареи трех типов: панцирные, решетчатые и с большими поверхностями пластин.

Для обеспечения нормальной зарядной характеристики свинцовой аккумуляторной батареи требуется постепенно снижать ток при основном заряде и после начала сильного газообразования, соответствующего окончанию основного заряда, резко снижать величину зарядного тока и переводить аккумуляторы на режим подзаряда (см. рис.). Оказывается, что плавное



Зарядные характеристики трех типов аккумуляторных батарей электрокара

1 и 4 — ток и напряжение железно-никелевой или кадмиево-никелевой батареи; 2 и 5 — ток и напряжение свинцовой панцирной батареи; 3 — ток свинцовой батареи с пластинами большой поверхности; А — время основного заряда; В — время подзаряда

уменьшение тока во время основного заряда может быть осуществлено совершенно автоматически при использовании в схеме станции сухих селеновых выпрямителей вместо применявшихся ранее групп унформеров. Это объясняется тем, что возрастание э. д. с. батареи и увеличение внутреннего сопротивления выпрямителей из-за их нагрева до рабочей температуры 40—60° уменьшают первоначальную разность потенциалов между батареей и выпрямителем.

Скачкообразное уменьшение тока при переводе батарей на режим подзаряда осуществляется с помощью автоматически управляемого балластного сопротивления, закороченного во время основного заряда.

Следует отметить, что к. п. д. зарядной станции, оборудованной селеновыми выпрямителями, зависит от режима заряда и в среднем значительно выше, чем при использовании унформеров, а именно достигает 64,8%.

В практике различаются два основных типа зарядных станций: 1) с зарядным автоматом для управления общим временем заряда и 2) с зарядным автоматом для управления временем подзаряда.

Автоматические зарядные станции питаются от сети. Они компактны, и конструкция их чрезвычайно проста.

Нормальная зарядная станция оборудуется двумя зарядными автоматами, управляющими временем подзаряда батарей. Станция при помощи простых переключений на щитке управления может заряжать при различных типах батарей с разными зарядными характеристиками. Для лучшего охлаждения селеновые выпрямители располагаются в шахматном порядке.

Инж. А. А. ИВАНОВ

Срок службы электромобилей. *Helios (Германский электроэкспорт)*, стр. 79—80, № 2 (август), 1940.

Срок службы автомобиля редко превышает 8—10 лет. Электромобили служат значительно дольше. Известны случаи непрерывной эксплуатации электромобилей в течение 15—30 лет.

Так например, 17 электромобилей, обслуживающих коммунальный транспорт Дортмунда, имеют возраст уже 22 года; интересно отметить, что эти электромобили эксплуатировались с прицепами, на что они не были рассчитаны при их постройке. Значительный срок службы среди грузовых электромобилей Дортмунда имеют также восемь 5-t грузовиков, находящихся в эксплуатации с 1917—1919 гг.

В Берлине среди электромобилей для очистки улиц эксплуатируются по настоящее время 6 моечных электромобилей выпуска 1911—1912 гг. и 24—1913—1914 гг. В Кельне на городской электростанции с 1915—1919 гг. находятся в эксплуатации три 5-t электромобили и шесть 10-t электротягачей. В Эссене успешно эксплуатируются 3 электромобили выпуска 1907—1911 гг.

Среди почтовых электромобилей в разных городах Германии имеется значительное число электромобилей выпуска до 1923 г., самым старым представителем которых является электромобиль, построенный в 1912 г., т. е. один из первых электромобилей периода первых попыток использования электромобилей для почтовых перевозок в Германии (1909 г.).

Основными причинами долговечности электромобилей, несмотря на тяжелые условия эксплуатации, является меньшая скорость по сравнению с автомобилем, а также отсутствие толчков и вибраций, присущих двигателю внутреннего сгорания, наряду с отсутствием у электромобиля коробки скоростей и сцепления.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

Проект норм на взрывобезопасный безрельсовый электротранспорт. *ETZ*, стр. 914, Heft 40, 1940.

После рассмотрения основных правил техники безопасности, в разделе проекта норм DIN—E—43580 приводятся основные технические данные электрокар и электротягачей.

Для электрокар максимальная грузоподъемность устанавливается в 2000 кг. Ходовая скорость при полной нагрузке при езде на площадке нормируется в 12 km/h, а при езде без нагрузки — в 15 km/h. Максимальный подъем определяется в 150‰ без нагрузки и 60‰ при полной нагрузке (под максимальным подъемом понимается преодоление подъема протяжением в 150 м при езде без остановок с одного пуска).

Для электротягачей грузоподъемность прицепа при полной нагрузке устанавливается в 4000 кг. Ходовая скорость при езде на площадке с нагрузкой устанавливается в 7,5 km/h и для езды без нагрузки — 15 km/h. Часовое тяговое усилие на крюке при скорости в 10 km/h составляет 80 кг, а максимальное кратковременное тяговое усилие (в течение 5 мин) при скорости 4 km/h устанавливается в 250 кг. Максимальный подъем без нагрузки — 150‰, а с полной нагрузкой — 40‰.

Как электрокары, так и электротягачи оборудуются стандартными (согласно DIN 43572) аккумуляторными батареями: решетчатого типа — 40 банок общей емкостью 200 Ah, панцирного типа — 40 банок емкостью 160 Ah или стальными батареями — 66 банок (типа LSAVC 1520) при емкости 158 Ah.

В разделе V реферруемого проекта норм указываются основные размеры электрокар и электротягачей.

Для электрокара: длина — 3350 mm, ширина — 1300 mm, высота платформы (с допуском ± 20 mm) — 830 mm, база (с допуском ± 75 mm) — 1575 mm, колея — 950 mm, радиус поворота — 4500 mm. Для электротягачей: длина — 2850 mm, ширина — 1300 mm, база (с допуском ± 75 mm) — 1000 mm, колея — 950 mm, радиус поворота — 2800 mm.

Как электрокары, так и электротягачи должны оборудоваться пневматическими шинами.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

Влияние полярности на износ контактного провода. *El. Ry Traction*, стр. 63 и 67, № 88, 1940.

Большинство электрических железных дорог постоянного тока работает с контактным проводом положительной полярности, и только некоторые системы имеют отрицательную полярность. Между тем полярность контактного провода оказывает определенное влияние на износ проводов.

При наличии отрицательного контактного провода существенное влияние имеет электрохимический эффект, извест-

ный как эндосмос, или электрический осмос, результатом которого является повышенная тенденция к отложению влаги вокруг отрицательного проводника, вследствие чего оказывается непрактичным поддерживать потенциал контактного провода ниже потенциала земли. Перемена полярности может сопровождаться, однако, значительным увеличением нормальной утечки тока между положительным и отрицательным проводниками.

Влияние отмеченной выше полярности контактного провода на его износ изучалось на дорогах Vascongados и Bilbao—Portugalete, работающих с контактным проводом положительной полярности. В то же время другая электрическая железная дорога того же округа Bilbao—Las Arenas работала с проводом отрицательной полярности. Было отмечено, что при наличии положительного контактного провода средний износ его на 100 000 проходов пантографа составил 1,27 мм для одной дороги и 1,15 мм для другой, в то время как на участках, оборудованных отрицательным контактным проводом, износ провода составил только 0,156 мм. Ввиду этого было решено изменить полярность на первых участках, что и было сделано в 1936 г.; однако после первого же шторма с дождем пришлось возвратиться к первоначальной полярности из-за недостаточной изоляции.

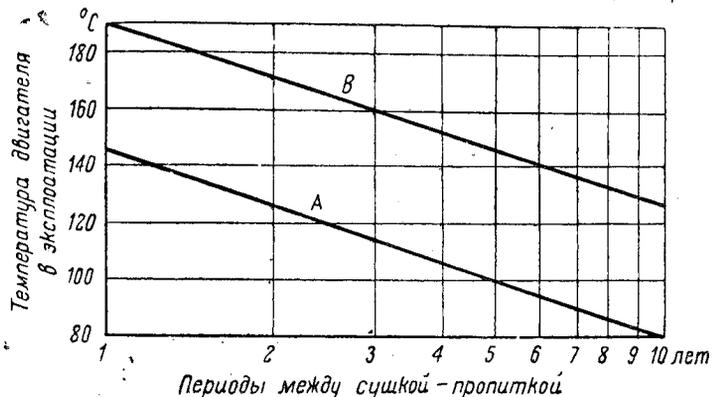
Исследователи этого вопроса в результате пришли к выводу, что износ проводов с отрицательной полярностью безусловно меньше и что перемена полярности существующих линий должна производиться после тщательного изучения местных условий, изоляции рельсов, нефтепроводов и т. д., особенно в местах с постоянной влажностью, например, в тоннелях.

Инж. М. Д. ТРЕЙВАС

Graham Lee Moses. Удлинение срока службы изоляции тяговых электродвигателей. *Transit Journal*, стр. 280—281, № 8, 1940.

Удары, вибрация и нагрев, которым подвержены в эксплуатации тяговые двигатели, вызывают появление трещин в лаковом слое, покрывающем изоляцию обмоток. Кислород воздуха, проникая через трещины, вредно действует на изоляцию, понижая ее диэлектрическую прочность. Особенно вредно сказывается сырость, вызывая снижение сопротивления изоляции в 1000—10 000 раз.

Опыт американских электрических железных дорог показывает, что профилактическая сушка и пропитка якорей и обмотки возбуждения тяговых электродвигателей увеличивают срок службы изоляции, делая ее более стойкой в электрическом, механическом и термическом отношении. Наилучшие результаты дает пропитка высококачественным лаком с хорошими изолирующими свойствами.



Покрытие поверхности лаком значительно удлиняет срок службы основной изоляции; заполнение пор и трещин замедляет начавшееся разрушение ее. Рекомендуемые интервалы между сушками-пропитками приводятся в диаграмме. Линия A этой диаграммы относится к двигателям с изоляцией класса A; линия B соответствует изоляции класса B. Как видно из этой диаграммы, пропитка должна производиться тем чаще, чем выше температура двигателя в эксплуатационных условиях. Для сушки отсыревших частей требуется температура печи для изоляции класса A 110° и для изоляции класса B 125°. Если двигатели сильно отсырели, требуется вакуумный метод сушки. Большое значение имеет правильная конструкция печи. Желательно автоматическое поддержание постоянства температуры и одновременно возможность регулирования нагрева. Необходима вентиляция, причем свежий воздух должен быть предварительно

подогрет или смешан с горячим, прежде чем притти в соприкосновение с изоляцией.

В последнее время для ускорения процесса сушки применяются лампы, излучающие инфракрасные лучи. В реферированной статье приводится методика сушки и пропитки тяговых двигателей.

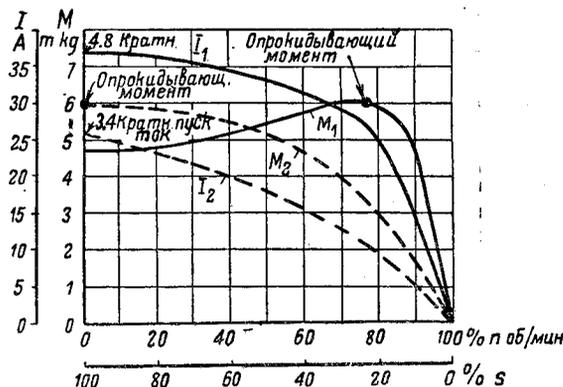
Инж. В. Н. КОНОВАЛОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

P. Loke. Асинхронные двигатели со ступенчатым изменением числа оборотов. *E. u. M.*, стр. 40—44, Heft 3/4, 1940.

Применение асинхронных двигателей со ступенчатым изменением числа оборотов значительно упрощает и удешевляет конструкцию станков, приводимых двигателем, так как отпадает необходимость в коробе скоростей. В настоящее время асинхронные двигатели переменной скорости могут выполняться для 4 различных скоростей. Изменение числа оборотов двигателя достигается путем создания различных комбинаций включения обмоток (переключения полюсов, например, по схеме Dahlander—Lindström, предусматривающей параллельное включение частей обмоток (двойная звезда). Эта же схема позволяет получить в нижнем пределе оборотов (при соединении обмоток в треугольник) двойной момент при постоянной мощности. Область применения такого рода двигателей — электропривод строгальных станков.

Другим интересным универсальным типом двигателя является двигатель, имеющий, помимо ступенчатого изменения скорости, повышенное скольжение.



Сравнительные характеристики нормального асинхронного двигателя с двигателем повышенного скольжения пунктирные кривые и параметры с индексом 2).

Изменение скольжения достигается общепринятым методом — путем введения омического сопротивления в цепь ротора. Однако в отличие от применяемого в асинхронных двигателях с контактными кольцами отдельного, расположенного вне двигателя, добавочного сопротивления новый тип двигателя снабжен короткозамкнутым ротором, беличья клетка которого выполнена из материала с высоким удельным сопротивлением.

Область применения двигателей с повышенным скольжением — электропривод штампов, маховых установок и т. п., т. е. установок, требующих эластичного изменения числа оборотов.

Характерной особенностью этого типа двигателей является, что при доведении скольжения до 15%, при сохранении 2,4-кратного опрокидывающего момента, происходит смещение приложения опрокидывающего момента с 75% от синхронного числа оборотов двигателя до нулевой скорости.

Сравнительные характеристики асинхронного двигателя с нормальным скольжением и двигателя с повышенным скольжением представлены на рисунке.

Как видно из кривых, пусковой ток универсального двигателя с повышенным скольжением на 29% ниже, чем для обычного асинхронного двигателя, при одновременном увеличении на 25% пускового момента.

Повышенный нагрев ротора нового типа асинхронного двигателя не играет существенной роли, так как двигатель предназначен главным образом для прерывистой работы.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

W. E. Moore. Дуговые электроды в современной промышленности. *The Electrochem. Soc.* № 4, 1940.

Автор реферируемой статьи, известный конструктор электрических печей, в представленной в Электрохимическом обществе работе утверждает, что современные сталеплавильные электроды, благодаря конструктивным усовершенствованиям, а также повышению качества огнеупоров и электродов, успешно конкурируют с марганцами даже при плавке углеродистых сортов стали. В США имеется 12 компаний, производящих обыкновенное сортовое железо, оборудованных электросталелитейными цехами. В области плавки специальных сталей за электродными остается преимущество большей гибкости и точности производства. В литейном производстве электрические печи имеют особенное распространение в цехах мелкого и среднего литья, а также при высокотемпературном литье. Электрические печи удобны при центробежных отливках. Развитию электротермии и электрометаллургии способствует электрификация США, в частности, строительство таких крупных электростанций, как Бонневиль и Болдер-Дам.

Отмечается, что успехам электродов способствовало улучшение электродов. Улучшен материал как угольных, так и графитовых электродов, и особенно их обработка.

В последнее время получил распространение целый ряд новых огнеупоров, обладающих специальными качествами. Особенно много сулит широкое применение футеровки из муллита благодаря большому сроку службы огнеупора из плавленного муллита.

Конструктивные улучшения электрических печей подчинены основной задаче повышения их производительности как путем сокращения длительности плавки, так и путем ускорения разливки и загрузки, а также и ремонтных работ. Современные электрические печи имеют большую скорость опрокидывания, обеспечивающую быстрый слив, хорошо разработанный механизм подъема и поворота свода, позволяющий очень быстро произвести завалку шихты.

Автор отмечает значительное усовершенствование конструкции электрододержателей. Их охлаждение делается столь совершенным, что электрододержатели охлаждают наиболее уязвимый участок электрода над сводом, уменьшая окисление его поверхности.

Наибольший эффект получен от механизации загрузки. Коренное улучшение показателей эксплуатации печей получено применением поворачивающегося свода. Последним достижением электротеплового является поднимающийся и поворачивающийся вокруг вертикальной оси свод.

Первые электроды могли использовать скрап с объемным весом 2160—2410 kg/m^3 , позднее объемный вес снизился до 1280—1600 kg/m^3 , а сейчас на многих заводах плавят скрап с объемным весом 560—800 kg/m^3 .

Насколько актуальны показатели работающих быстроходных электродов, показывают следующие данные: на одном заводе работает печь емкостью 12 т с трансформатором 7500 kVA . Ежедневная продукция составляет 198 т торговых слитков, средний расход электроэнергии составляет 680 kWh/t товарной продукции. Полный цикл плавки составляет 2 часа.

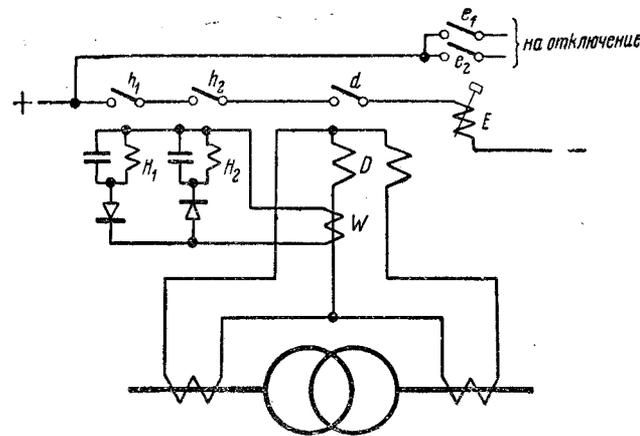
В заключение автор утверждает, что дуговые печи имеют большие перспективы развития.

Инж. М. А. ЧЕНЦОВ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

F. Jahn. Быстродействующая дифференциальная защита трансформаторов. *AEГ-Mitt.*, стр. 163—167, Heft 7/8, 1940

Толчок намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора создает в цепи дифференциальной защиты токи, могущие вызвать ее ложное срабатывание. Для борьбы с этим дифференциальная защита обычно снабжается выдержкой времени или блокируется на некоторое время после включения трансформатора, достаточное для затухания намагничивающего тока. Общим недостатком этих способов является замедленное отключение при включении в сеть поврежденного трансформатора. Более совершенными являются способы с блокировкой дифференциальной защиты при появлении в цепи дифференциального реле тока, обладающего особенностями тока включения ненагруженного трансформатора. Этими особенностями являются: 1) большое содержание высших гармонических и 2) значительное, медленно исчезающее неравенство положительных и отрицательных амплитуд. Первая особенность была использована в выпущенных во Франции и Америке реле с током срабатывания,



Принципиальная схема быстродействующей дифференциальной защиты трансформатора

D — процентно-дифференциальное реле; H₁ и H₂ — «полувольтные» реле; W — промежуточный трансформатор тока; E — промежуточное реле

зависимым от содержания высших гармонических. Вторая особенность используется в схеме, приведенной на рисунке. В этой схеме для мгновенного отключения трансформатора необходимо одновременное срабатывание трех реле: процентно-дифференциального реле D и двух реле H₁ и H₂, реагирующих каждое только на одну полуволну тока в цепи рабочей обмотки реле D. Реле D срабатывает только от внутренних повреждений и от токов включения трансформатора, предотвращая отключение трансформатора под влиянием токов небаланса при сквозном коротком замыкании.

При коротких замыканиях в трансформаторе аperiodическая составляющая тока очень быстро затухает, трансформатор в этом случае отключается всегда практически мгновенно.

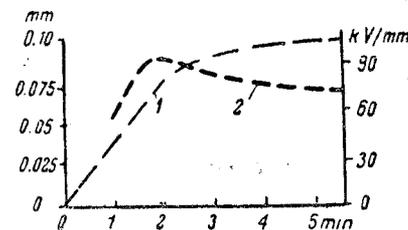
Инж. Б. И. ФИЛИПОВИЧ

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

A. Gemant. Электроотложение синтетических смол. *Ind. and Eng. Chem.*, стр. 1223, № 10, 1939.

Возможность использования явления электрофореза, т. е. переноса коллоидных частиц в эмульсиях и суспензиях действием электрического поля, для получения каучуковых и тому подобных покрытий была известна уже давно. Электрофорез каучука производится в латексе, в котором каучуковые частички взвешены в воде. Лишь в последние годы установлена возможность использования электрофореза в неводной среде для получения электроизоляционных покрытий по металлу. Преимущество электрофореза в неводной среде для электроизоляционной техники очевидно: исключается возможность попадания воды в изоляционный слой.

Автором были проведены в лаборатории Уисконсинского университета опыты по получению посредством электрофореза слоев синтетических смол (полистирола, полиметилме-



такрилата, полибутилметакрилата и модифицированной карбамидноформальдегидной смолы). Подвергавшиеся исследованию смолы растворились в подходящих растворителях (полистирол — в ксилоле, прочие смолы — в хлороформе); так как эти растворы являются молекулярными, они непригодны для электрофореза; для последней цели использовалась смесь этих растворов с минеральным маслом; в ряде случаев применялись и другие добавки и тепловая обработка. Покрытия производились как на пластинках, так и на проволоках. Получались прочно держащиеся, обладающие хорошими электроизоляционными свойствами слои. С целью повышения эластичности слоя с успехом применялась добавка пластификатора (дибутилфталата) к составу для электрофореза. Величина электрокинетического потенциала для

полистирола в данной работе была определена равной 66 mV.

Приводим на рисунке зависимость толщины в mm (кривая 1) и пробивной напряженности в kV/mm (кривая 2) полистиролового покрытия от времени электрофореза в минутах при напряжении на электрофоретической ванне 1000 V.

Опыты Геманта представляют большой интерес. Должен быть поставлен вопрос об использовании электрофореза для получения электроизоляционных покрытий на проводах и в различных случаях практической электротехники.

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

T. R. Scott. Эстерифицированная и стиролизованная изоляция. *El. Times*, стр. 45, № 2517, 1940.

Как известно, целлюлоза при обработке кислотами дает сложные эфиры (эстеры); например, при обработке в определенных условиях целлюлозы уксусной кислотой или уксусным ангидридом, целлюлоза переходит в ацетилцеллюлозу, обладающую хорошими электроизоляционными свойствами и пониженной по сравнению с исходной целлюлозой гигроскопичностью. Поэтому частичная эстеризация целлюлозной изоляции (бумаги или ткани) повышает ее влагостойкость¹. Автор исследовал ацетилирование целлюлозной изоляции и получил ряд интересных результатов. Постепенное улучшение свойств кабельной бумаги в результате повышения глубины ацетилирования иллюстрируется следующими числами: $tg \delta$ при 50 Hz и 65° C для чистой сухой бумаги 0,0050; для бумаги с 15% связанной уксусной кислоты — 0,0038; с 30% — 0,0032; с 45% — 0,0030. Пробивная напряженность увлажненной ацетилированной бумаги составляет 50—70% от значения для сухой бумаги. Скотт указывает далее, что ацетилирование повышает теплостойкость бумаги. Так как ацетилированная бумага все же сохраняет известную гигроскопичность, то для дальнейшего снижения последней предлагается пропитка мономером стирола с последующим нагревом для полимеризации; для повышения эластичности к стиролу могут добавляться пластификаторы. Величина $tg \delta$ стиролизованной и ацетилированной целлюлозы ниже, чем ацетилированной целлюлозы без обработки стиролом.

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

H. Horn. Получение и применение электроизоляционного материала. „Styroflex“. *Kunststoffe*, стр. 353, № 3, 1940.

Как известно, полистирол ($C_6H_5 - CH = CH_2$) представляет собой высококачественный электроизоляционный материал с прекрасными диэлектрическими характеристиками и ничтожной гигроскопичностью. $tg \delta$ полистирола всего $1 \div 2 \cdot 10^{-4}$; $\epsilon = 2,5$; поверхностное удельное сопротивление $10^{16} \Omega$, внутреннее сопротивление $10^{17} \Omega$. Наибольшая водопоглощаемость 0,03% (по весу). Чистый материал чрезвычайно стоек по отношению к старению. При температуре 70—90° C материал, обладающий свойствами термопласта, размягчается и с успехом может обрабатываться посредством шприцгусса. Благодаря этим свойствам полистирол получил весьма широкое применение в электротехнике.

Германская фирма Norddeutsche Seekabelwerke в Nordenham разработала под названием «Styroflex» материал, получаемый из полистирола под давлением 50—100 ат посредством чисто механической обработки без добавления пластификаторов, отличающийся в то же время исключительной эластичностью.

Реферлируемая статья содержит подробное описание технологии получения различных стирофлексовых изделий и применения их для конденсаторов, кабелей, обмоточных проводов и т. п. Обмоточные провода, изолированные стирофлексовым шелком, обладают прекрасными электроизоляционными характеристиками; однако следует все же иметь в виду, что стирофлексовый шелк менее прочен, чем натуральный шелк и хлопчатобумажная пряжа.

Статья иллюстрирована 13 фотографиями.

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

¹ Влияние частичного ацетилирования бумаги на ее влагостойкость было ранее показано проф. М. М. Михайловым (Труды III Всесоюзной конференции по электроизоляционным материалам. Ленинград 1934) [Прим. реф.].

H. Thurnauer, A. E. Badger. Диэлектрические потери стекол при высоких частотах. *Journ. Amer. Ceramic Soc.*, стр. 9—12, в. 23, 1940.

Авторы подробно исследовали $tg \delta$ стекол различного химического состава. Измерения производились с помощью обычного куметра в интервале частот от 100 до 5000 kHz.

Для стекол состава $Na_2O - CaO - SiO_2$ наименьшее значение $tg \delta$ (0,38% при 100 kHz; 0,23% при 5000 kHz) найдено при соотношении количеств составных частей: 10,5% Na_2O ; 28,5% CaO и 61% SiO_2 . Эта рецептура стекла рекомендуется для использования в высоковольтной технике. Особо большой $tg \delta$ получается у щелочных стекол без содержания CaO , например, для состава 36% Na_2O и 64% SiO_2 $tg \delta$ составляет 19,3% при 100 kHz; 6,7% при 500 kHz; 1,96% при 1500 kHz и 1,83% при 5000 kHz. При этом уменьшение содержания Na_2O за счет SiO_2 понижает потери; так, для 36% Na_2O и 64% SiO_2 $tg \delta = 19,3\%$, для 34% Na_2O и 66% SiO_2 ... 9,10%; для 30% Na_2O и 70% SiO_2 ... 5,28%; для 28% Na_2O и 74% SiO_2 ... 3,85%; для 22% Na_2O и 78% SiO_2 ... 2,50% (во всех этих случаях даем $tg \delta$ для 100 kHz).

Для осевых составов стекла получены следующие значения $tg \delta$ (в %):

Частота в kHz	100	500	1500	5000
Стекло „пирекс“	0,45	0,45	0,42	0,41
Плавленый кварц	0,06	0,04	0,02	0,00

Для всех испытанных стекол при повышении частоты в пределах от 100 до 5000 kHz величина $tg \delta$ закономерно уменьшается.

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

C. M. Faust, N. Rohats. Современные достижения в технике высоковольтных импульсных испытаний. *El. Eng.*, стр. 257—265, № 5, 1940.

Современное развитие импульсных испытаний при коротких временах потребовало во избежание появления сильных колебаний специального тщательного выполнения схемы генератора импульсов.

Специальный раздел реферлируемой статьи посвящен методике расфидровки осциллограмм и определению повреждения объекта по виду осциллограмм и наблюдаемым явлениям при испытаниях.

Авторы разработали и испытали схему, изображенную на рисунке, дающую удовлетворительные результаты непосредственного измерения напряжения между отпайками. Комбинации емкостей C_1, C_2 и C_3, C_4 — одинаковые делители, имеющие достаточно малые емкости, чтобы не исказить напряжения отпайки. Элемент схемы B — усиливающий инвертер и A — усилитель. В точке P волны напряжения от правого и левого делителя накладываются и имеют противоположную полярность.

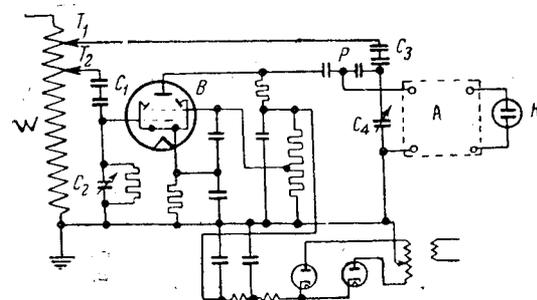


Схема осциллографирования напряжения между отпайками

Осциллограф, присоединенный через усилитель A , регистрирует таким образом напряжение между точкой P и землей, равное мгновенной разности напряжений от левого и правого делителя. Предварительная настройка схемы состоит в том, что оба провода T_1 и T_2 присоединяют к T_1 и регулируют C_3 и C_4 таким образом, чтобы отклонение луча было равно нулю. Делители схемы должны быть весьма симметричны, усилитель не должен давать искажений. Инвертер должен иметь минимальное запаздывание между на-

пряжением сети от емкостей C_1 , C_2 и выходным напряжением в точке Р.

Статья подверглась дискуссии, в которой был сделан ряд дополнительных уточнений и приведены возражения к некоторым положениям автора. Например, указывалось на необходимость тщательного контроля длины подводки к объекту и потенциометру, так как неправильное расположение потенциометра может вызвать весьма значительную погрешность; указывалось на отсутствие необходимости иметь волновые сопротивления на обеих сторонах кабеля от делителя к осциллографу.

Инж. Е. В. КАЛИНИН

J. T. Mireles Malpica, W. R. Fantés. Новый фотометр для спектрограмм. *GER, стр. 384—385, № 9, 1940.*

Распространение в заводских лабораториях методов количественного спектрального анализа требует создания микрофотометра простой конструкции, пригодной для массового производства и не требующей квалифицированного обслуживания.

В реферируемой статье описан прибор для измерения спектрограмм, сильно отличающийся от обычных микрофотометров.

Свет точечной лампы с помощью оптической системы отбрасывается на измеряемый негатив, образуя на последнем равномерно освещенное поле около 8 мм диаметра. Изображение освещенного поля с помощью второй оптической системы, состоящей из объектива и призмы внутреннего отражения, проектируется на экран в сильно увеличенном виде (увеличение около 20 раз). В экране прорезана щель, ширина которой может изменяться. За щелью помещен фотоэлемент, фотокот которого измеряется зеркальным гальванометром. Шкала гальванометра укреплена на ящике прибора над экраном с фотоэлементом и щелью. Полное отклонение гальванометра (500 мм) соответствует световому потоку через прозрачный участок негатива размерами $0,025 \times 0,5$ мм.

Инж. А. И. ФРОЙМАН

Strobel, Lieneweg и др. Светоэлектрическое измерение влажности. *ETZ, стр. 515—518, Heft 23, 1940. ETZ, стр. 665—668, Heft 29 и стр. 690—692, Heft 30, 1940; VDI-Zeitschr., стр. 755—759, № 40, 1940; AEG-Mitt., стр. 156—160, Heft 7/8, 1940.*

В реферируемых статьях рассматриваются способы электрического измерения ряда неэлектрических величин.

Определение относительной влажности основано на измерениях температуры воздуха и температуры точки росы. Оба измерения производятся при помощи термометров сопротивления.

Для получения температуры точки росы служит маленькое зеркальце, отшлифованное и хромированное на небольшой площадке медной трубки, через которую протекает охлаждающая вода. Свет лампы накаливания, отражаясь от зеркальца, падает на фотоэлемент, напряжение которого заряжает сетку тиратрона, в анодной цепи которого находится обмотка магнита, открывающего вентиль охлаждающей воды. При достижении точки росы зеркальце покрывается влагой, перестает отражать свет лампочки, фотоэлемент и тиратрон гаснут, водяной вентиль закрывается и остается закрытым до тех пор, пока влага на зеркальце не испарится, после чего процесс повторяется снова. Показания обоих термометров при помощи двойного мостика передаются на стрелочный или самопишущий прибор, указывающий относительную влажность в процентах.

Прибор пригоден для широких пределов колебаний температуры от -10 до $+350^\circ$.

Определение концентрации водородных ионов основано на том, что некоторые электроды, находящиеся в жидкости, принимают потенциал, зависящий от концентрации водородных ионов. К числу таких электродов, пригодных для непрерывных показаний, относятся сурьмяные и стеклянные электроды.

Универсальным электродом является тонкая стеклянная мембрана, потенциал которой, следуя закону Нернста ($E = 0,058 \lg \frac{c_1}{c_2}$), где c_1 и c_2 — концентрации водородных ионов у обоих электродов, отделенных пористой перегородкой), изменяется пропорционально концентрации водородных ионов.

Сопротивление стеклянных электродов — от 0,3 до 20 МΩ, Чувствительность — 0,58 мВ/‰Н. Вследствие большого вну-

треннего сопротивления приходится применять схемы с усиленными лампами. В качестве второго, исходного электрода применяется электрод из каломели, потенциал которого не зависит от концентрации водородных ионов.

Надзор за работой котельной установки требует знания давления, количества и температуры питательной воды, давления воздуха, состава отходящих газов, температуры, давления и количества пара.

Наиболее сложным является исследование состава отходящих газов, в которых необходимо определить в процентах содержание CO_2 и отдельно — содержание CO и H_2 .

Для определения CO_2 служат 4 проволоочки, составляющие 4 ветви мостика и нагреваемые током. 2 проволоочки омываются воздухом и 2 — отходящими газами. Чем больше в газах содержание углекислоты, тем больше теплопроводность. Интенсивность охлаждения проволоочек увеличивается, а вместе с тем сопротивление их уменьшается. Показание процентного содержания CO_2 осуществляется указательным прибором с помощью мостовой схемы.

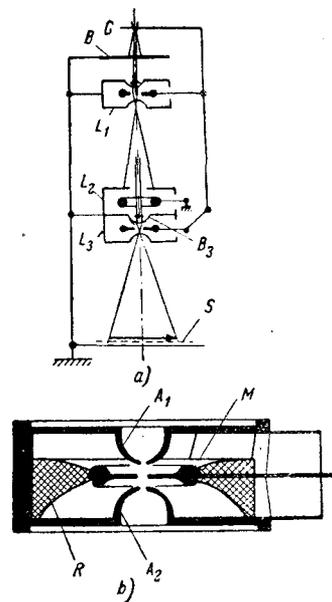
Для определения содержания горючих составных частей газов (H_2 и CO) газы смешиваются с воздухом и пропускаются через камеру с двумя проволоочками, из которых одна покрыта катализатором, вызывающим сгорание H_2 и CO . Получающееся при этом увеличение температуры и сопротивления проволоочки вызывает также нарушение равновесия мостика и отклонение прибора.

Инж. Л. Б. БРОУДЕ

СВЕТОТЕХНИКА

Henneberg. Сверхмикроскоп с электростатическими линзами. *ETZ, стр. 773—776, Heft 34, 1940.*

Сверхмикроскоп с электростатическими линзами представляет собою один из пяти видов электронных сверхмикроскопов. Общая схема микроскопа аналогична оптическому микроскопу (рисунок а) и состоит из раскаленного катода G , являющегося источником электронов, освещающих объект анодной диафрагмы B , дающей электронам ускорение электронных линз (объективной линзы L_1 и проекционных линз L_2 и L_3), — и экрана S , служащего для рассматривания и могущего быть замененным фотографической пластинкой.



Так как электронный луч требует высокого вакуума, то весь микроскоп помещается в сосуде с вакуумом. Для введения в микроскоп и перемены в нем объектов, а также для введения и смены фотопластинок в микроскопе имеется два шлюзовых затвора. Для фотосъемки в микроскоп помещается кассета с 24 пластинками. Смена снятых пластинок производится поворотом ручки, причем снятая пластинка соскальзывает через внутреннюю заслонку в камеру шлюзового затвора, откуда может быть вынута через наружную дверку. На место снятой пластинки также автоматически устанавливается следующая свежая пластинка. Электростатические линзы (рисунок б) состоят из двух внешних электродов A_1 и A_2 , присоединяемых к отрицательному полюсу, и одного внутреннего положительного электрода M . Средний электрод изо-

лирован эбонитовым кольцом R. Линзы присоединяются к выпрямленному току в 50—60 kV.

Для удобства нахождения на объекте части, подлежащей увеличению, проекционная линза состоит из двух линз, включаемых попеременно, как у оптических микроскопов с револьверной головкой. Переключение с малого увеличения на большое и обратно производится простым переключением проводников с одной линзы на другую.

Электростатическим сверхмикроскопом легко могут быть достигнуты увеличения в 40—50 тыс. раз, т. е. в 20—25 раз больше, чем в оптических микроскопах.

Инж. Л. Б. БРОУДЕ

Rohloff. Новейшая техника дуговых прожекторов. ETZ, стр. 389—394, Heft 18, 1940.

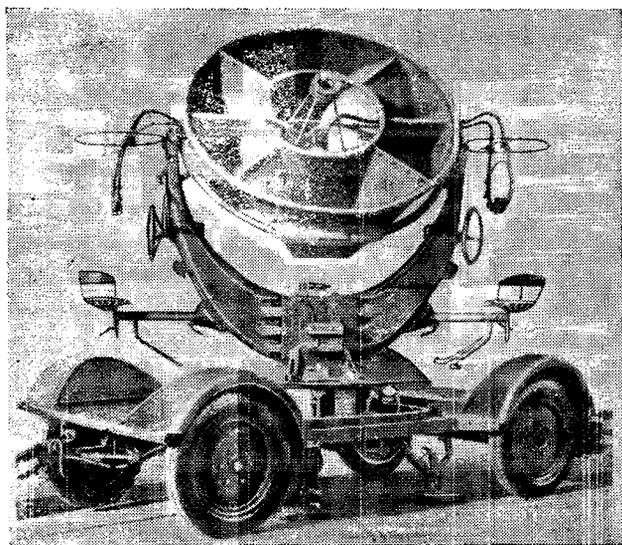
Прожекторы должны удовлетворять следующим основным требованиям: обладать большой дальностью действия, т. е. давать возможно большую силу света, и должны быть легко управляемы.

Прожекторы существуют уже около 90 лет. Изготавливавшиеся ранее металлические параболические зеркала имели весьма малую отражательную способность. В 1885 г. Сименсу удалось изобрести машину для шлифовки параболических зеркал из стекла. В 1900 г. был изготовлен первый прожектор с двухметровым диаметром зеркала.

Кратер является основным источником света, яркость его равняется около 180 свечей Гефнера на 1 mm² светящейся поверхности и почти не зависит от силы тока. Углы с фитилем, пропитанным солями редких земель, дают в 4 раза большую яркость.

Существенную роль играет экранирование светящегося пламени дуги, которое является при горизонтальных целях источником вредного освещения земли и объектов вблизи прожектора. Это освещение мешает наблюдениям и демаскирует прожектор. Совершенно устраняется это вредное освещение близких объектов подвешиванием дуговой лампы к верхней части прожектора, вследствие чего пламя направляется вниз.

Прожекторные дуговые лампы снабжаются автоматическим регулятором, в котором термостат поддерживает кратер положительного угля в пределах фокуса зеркала с точностью до ± 1 mm. Регулировка положительного угля происходит при помощи реле напряжения и тока, приходящих в действие при увеличении длины дуги сверх нормы. При старении углей ток выключается автоматически. Дуга зажигается при помощи быстросействующего приспособления в течение около 0,02 sec.



Звукоуловитель с корректированием запаздывания звука

В последнее время прожекторы снабжаются диафрагмой, расположенной у кратера и служащей для закрывания после выключения лампы раскаленных углей, чтобы сделать их невидимыми для неприятеля.

Стандартными для сухопутных установок Германии являются 2 типа: с диаметром зеркала в 150 см с силой света в 1,2 млрд. свечей при токе в 150—200 А, дальности действия от 4 до 12 km, а также с зеркалом, диаметром в

60 см силой света 140 млн. свечей при токе в 60—100 А и дальности действия от 2 до 6 km.

Прожекторы устанавливаются или неподвижно, как на судах, или же на прицепах. Машинный агрегат сухопутных прожекторов, состоящий большей частью из бензинового двигателя и генератора, также выполняется передвижным.

Управление прожектором происходит вручную с помощью специального дышла, или электрически, с расстояния в 30—50 м, при помощи синхронного датчика, снабженного зрительной трубой, и производящего движения синхронно с движением прожектора. Для управления имеется только одна ручка, движущаяся в вертикальном и горизонтальном направлениях. К полной прожекторной установке относится также звукоуловитель для определения направления цели. Невооруженным ухом можно определить направление с точностью в 3°, тогда как звукоуловитель с далеко отстоящими друг от друга раструбами увеличивает точность до 0,5°. Современные звукоуловители снабжаются также приспособлениями, корректирующими запаздывание звука (см. рисунок).

На судах звукоуловители неприменимы и заменяются очень светосильными зрительными трубами. В последнее время на судах увеличивается применение стабилизаторов прожекторов, благодаря которым прожектор остается в покое даже при сильной качке корабля.

Инж. Л. Б. БРОУДЕ

I. W. Marden и др. Высокомощные ртутные лампы. Illum. Eng., стр. 458, № 5, 1940.

Успехи, достигнутые в промышленных образцах ртутных ламп сверхвысокого давления, побуждают вести дальнейшую исследовательскую работу с более мощными лампами.

Авторы описывают два экспериментальных типа мощных ламп с водяным охлаждением. Первый тип представляет собой прямую кварцевую трубку с внутренним диаметром 2 mm со впаянными по концам на расстоянии около 30 см вольфрамовыми электродами. Второй тип лампы состоит из такой же трубки, изогнутой в виде спирали, что придает большую компактность лампе. В трубки введены ртуть и аргон под небольшим давлением. Оба типа ламп вмонтированы в чехлы из стекла пирекс, по которым протекает со скоростью 11—12 l/min вода, охлаждающая разрядные кварцевые трубки.

Лампы включаются через специальный трансформатор, присоединяемый к сети переменного тока 220 V; вторичное напряжение холостого хода трансформатора около 10 kV.

Основные электрические и световые характеристики ламп приведены в таблице, где для сравнения указаны данные лампы типа H6—1000 W.

Типы ламп	Напряжение сети V	Напряжение на лампе V	Мощность лампы W	Горизонтальная сила света в свечах
1	208—240	От 6 000 до 7 400	От 6 480 до 10 650	От 36 500 до 75 000
11	220			
H6	115	7 000 880	9 100 1 276	43 000 7 900

Срок службы ламп сильно зависит от удельной нагрузки: при 1400 W/cm лампа живет несколько минут, при 400 W/cm — около 50 и более часов.

Нет принципиальных оснований к тому, чтобы нельзя было изготовить еще более мощные лампы. Так например, лампа в 20 kW может дать около 1,5 млн. lp и лампа в 50 kW — около 3,5 млн. lp. Однако на пути к созданию таких ламп нужно преодолеть некоторые технические трудности.

Канд. техн. наук Р. Г. ИЗВЕКОВ

A. Pahl. Затемнение при помощи фильтров, окрашенных в дополнительные цвета. Siemens. Zeitschr., стр. 112—116, № 3, 1940.

В реферируемой статье разбираются достоинства и недостатки английской системы затемнения Traffoblak¹. При этой системе затемнения помещения освещаются специальны-

¹ См. также реф. А. И. Фроймана в № 8 „Электричество“.

ми натриевыми лампами, а окна покрываются синим лаком, поглощающим желтую линию натрия.

Автор указывает, что светофильтры на окна пропускают всего 10—20% дневного света. С другой стороны, желтые натриевые лампы и окрашенные в оранжевый цвет лампы накаливания не дают возможности различать цвета, что сильно ограничивает область их применения.

Однако автор считает применение этого метода затемнения целесообразным для некоторых производств, а также для подсобных помещений (коридоры, лестницы и т. д.).

В статье приведен пример расчета такого затемнения и необходимые для расчета таблицы и кривые.

Инж. А. И. ФРОЙМАН

РАЗНОЕ

Н. А. Peterson, W. J. Rudge и др. Трубчатые разрядники для силовых систем. *El. Eng.*, стр. 282—292, № 5, 1940.

Реферруемая статья представляет систематизацию результатов исследований разрядников и восьмилетнего опыта их эксплуатации в США, а также содержит положения и данные, предположенные для стандартизации типов.

В начале статьи приведена теория работы трубчатых разрядников, в которой особое внимание уделено определению влияния скорости восстановления напряжения в сети и силы тока на работу разрядников, а также методика выбора разрядника.

В системах с трубчатыми разрядниками следует применять реле с временем действия не меньше двух периодов.

Разрядные характеристики трубок указаны в таблице.

Рабочее напряжение, кV	Минимальное сухое пробивное напряжение		Последовательный промежуток см	Защитные характеристики (с 10% запасом)	
	положительное	отрицательное		максимальное защищаемое искровое расстояние	число стандартных изоляторов (146 × 254 мм)
13,8	100	110	19	15	1
23	150	155	38	23	2
34,5	200	220	51	32	2
46	260	285	82	43	3
69	375	420	140	71	5
92	475	540	215	—	6
115	575	635	280	—	7

Авторы приводят характерные кривые, показывающие, что с уменьшением силы отключаемого тока увеличивается время, потребное для восстановления диэлектрической прочности трубки. Следует отметить также, что увеличение диаметра трубки на 30% вызывает удвоение нижнего предела трубки.

По опыту эксплуатации, в случае установки разрядников на каждой опоре линии, вероятность многократной их работы мала (например за 5 лет из 810 трубок 223 работали один раз, 63 — два раза, 13 — три раза, 8 — четыре и 0, — 5 раз).

Обычно трубки выдерживают токи от 50 до 100 кА с фронтом волны 10 мкс и эффективной длиной 20 мкс, но все же по опыту эксплуатации иногда наблюдаются случаи разрыва трубок токами молнии.

Авторы не дают определенных указаний о сроке службы покрова, но в дискуссии указано, что больше 3—4 сезонов покрова не выдерживает.

Трубки должны противостоять одному срабатыванию на верхнем пределе 5000 и 6000 А, двум — на пределе 3000 А и трем — на пределе 1500 А. После этого трубка способна выдержать два выключения на минимальном токе.

Статья подвергалась дискуссии, в которой некоторые выступавшие высказывали недоумение, что трубка стандартизируется на столь малое число отклонений. Andrews и Sornelius указывают, что в 34-kV системе из 196 трехфазных комплектов разрядников, установленных на больших расстояниях друг от друга, повредилось (разорвалось) 19 шт., т. е. 3% трубок. Те же лица указывают, что из трубок, работающих на пределе 1,2—10 кА, число аварийных меньше 3% за 6 лет, что следует считать удовлетворительным.

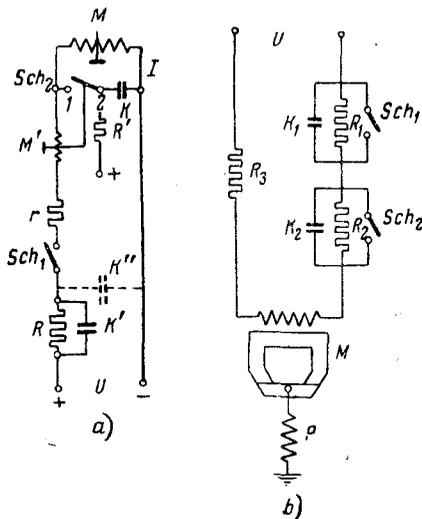
Инж. Е. В. КАЛИНИН

Blankenburg. Схемы соединений для быстродействующих магнитов. *ETZ*, стр. 693—696, Heft 30, 1940.

От электромагнитов и реле требуется большое тяговое усилие, быстрое действие и малое собственное потребление. Питание электромагнитов производится преимущественно постоянным током.

Из выведенных автором формул видно, что время действия электромагнитов не может быть уменьшено без увеличения потребляемой мощности, причем время действия зависит от скорости нарастания или спадания тока при включении или отключении электромагнита. Для ускорения нарастания силы тока можно использовать электрический удар, получающийся от разряда конденсатора, включаемого по различным схемам.

Конденсатор может быть включен последовательно с магнитом (рисунок а, — элементы K' , R , Sch_1 , r и M , где R —



токоограничивающее сопротивление и r — успокоительное сопротивление). Конденсатор может быть включен также параллельно магниту (элементы K'' , R , Sch_1 , r и M). Для еще большего ускорения нарастания силы тока схема рисунка а может быть применена целиком, причем конденсаторы K' и K'' служат для ускорения действия вспомогательного магнита M' , включающего выключатель Sch_2 . Конденсатор K разряжается здесь непосредственно, минуя сопротивление r .

Для ускорения действия магнита вместо электрического удара или в добавление к нему может быть использован механический удар, если длину хода магнита увеличить на некоторый предварительный холостой ход, во время которого магнит запасает энергию, отдаваемую затем во время рабочего хода. Для ускорения действия удерживающих магнитов может быть применена схема рисунка б, благодаря которой ускоряется спадание тока. Дальнейшее улучшение получается, если применить несколько последовательно включенных комплектов (K_1 , R_1 , Sch_1 , K_2 , R_2 , Sch_2 и т. д.).

Опыты показали, что схемы рисунка а дают ускорение действия магнитов примерно в 4 раза и на рисунке б — от 5 до 6 раз. Так как отключаемые таким образом индуктивности могут быть весьма большими, то, увеличив число витков, можно снизить потребляемую энергию на 70%. Скорость действия этих магнитов равняется примерно 0,004 sec.

Инж. Л. Б. БРОУДЕ

W. H. Hansen. Цинковые провода. *Elektrizitätswirtschaft*, стр. 372—373, Heft 27, 1940; *ETZ*, стр. 17, Heft 39, 1940.

Начать еще во время мировой войны, попытки использования цинковых проводов в установках низкого напряжения только в последнее время дали удовлетворительные результаты. Недостатки, свойственные цинку, — внутрикристаллическая коррозия, рекристаллизация и незначительная механическая устойчивость, — долгое время затрудняли применение цинковых проводов. Благодаря улучшению технологии производства в настоящее время получается цинк, не содержащий примесей (99,99% Zn) и не склонный к внутрикристаллической коррозии. Добавляя незначительное количество других компонентов, при получении цинка удается избежать и от явления рекристаллизации. Таким образом был получен сплав Zn — Al — 1, содержащий чистый цинк с примесью 0,8% Al и 0,4% Cu. Удельная проводимость этого сплава близка к проводимости Zn и равна $16,7 \frac{\text{м}}{\text{мм}^2}$.

Свойства сплава Zn—Al—1 в сравнении с свойствами Al и Cu приведены в таблице.

Наименование	Удельный вес	Сопротивление разрыву kg/mm ²	Относительное удлинение %	Число перегибов при r = 5 mm
Cu	тверд.	8,9	45	2
	мягк.	—	22	35
Al	тверд.	2,7	18	2
	мягк.	—	8	25
Zn—Al—1	7,1	20	80	34

Благодаря незначительной механической устойчивости цинковых проводов при обычном способе соединений увеличивается переходное сопротивление в месте контакта. Для устранения этого третьего недостатка фирмой AEG разработаны специальные соединительные клеммы, обеспечивающие с помощью пружин постоянное давление в месте контакта.

Автор считает наиболее целесообразным выпускать цинковые провода сечением 2,5 mm² с проводимостью, эквивалентной проводимости медного провода сечением 1,0 mm² или алюминиевого сечением 1,5 mm². Максимально допустимый ток для этого сечения 6 А. Цинковые провода могут применяться в сухих и взрывобезопасных помещениях.

Инж. П. П. ХРАМОВ

К. Tardel. Новый регулировочный трансформатор для плавного регулирования напряжения. *E. u. M., стр. 357—363, Heft 35/36, 1940.*

Регулировочный трансформатор состоит из обычного замкнутого магнитопровода, стержням которого придана цилиндрическая форма. Размещенные на стержнях обмотки — обычной конструкции. Вращающаяся вторичная обмотка располагается внутри первичной и представляет собой однослойную цилиндрическую обмотку из голого проводника, укрепленную на изолирующем цилиндре, могущем вращаться вокруг оси стержня магнитопровода. Один конец вторичной обмотки соединен со щетками, скользящими по поверхности стержня магнитопровода.

При поворачивании цилиндра со вторичной обмоткой вокруг оси стержня магнитопровода щетка переходит с одного листа железа сердечника на другой, изменяя, таким образом, постепенно поток, охватываемый контуром тока. Соответственно изменяется электродвижущая сила, наводимая во вторичной обмотке.

Принципиально такой регулировочный трансформатор близок к регулировочному трансформатору со щетками, скользящими по зачищенным от изоляции виткам обмотки. Различие состоит лишь в том что в описываемом трансформаторе напряжение витка, охватывающего сердечник, заменяется напряжением витка, охватывающего лишь один лист железа сердечника, что позволяет строить такие трансформаторы на значительно большие мощности. Автор статьи указывает, что такая конструкция целесообразна при мощностях от 50 kVA. Такой трансформатор может быть построен и на большую мощность свыше 700 kVA, но только с измененной конструкцией обмотки. Испытание модели мощностью в 5 kVA показало достаточную надежность подвода тока через железо сердечника.

Инж. Б. И. ФИЛИПОВИЧ

ПОПРАВКА

В журн. „Электричество“ № 12 1940 г., на стр. 18 и 68 напечатано М. И. Медведский. Следует — Н. И. Медведский



Измерительные диапазоны с непосредственным отсчетом.

Индуктивное сопротивление: от 1 микрогенри до 100 генри.

Омическое сопротивление: от 1 миллиома до 1 мегаома.

Емкостное сопротивление: от 1 микрофарады до 100 микрофарад.

В любой электро-лаборатории

где требуется измерение омического, индуктивного или емкостного сопротивления, этот универсальный мостик так же существенен, как и вольтметр или амперметр. Работа этого прибора не требует никакой вспомогательной аппаратуры. Прибор всегда находится в состоянии рабочей готовности для производства измерений вышеупомянутых величин, причем можно получить непосредственный отсчет в пределах исключительно широкого диапазона. Точность прибора вполне достаточна для любых требований, за исключением некоторых измерений, требующих особой точности. Питание постоянным током от 4 сухих батарей, а переменным — от зуммера на 1000 периодов.

Цена комплектного прибора (за исключением батарей) — — — 175 долл.

* Проспект 653 высылается по запросу.

GENERAL RADIO COMPANY

30 STATE STREET, CAMBRIDGE, MASS., U. S. A.

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

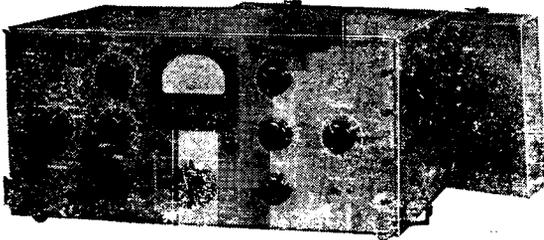
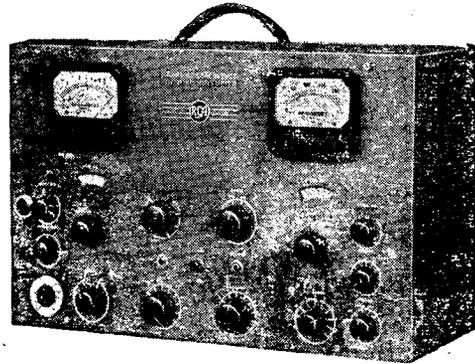
Отв. ред. инж. Я. А. КЛИМОВИЦКИЙ | Подп. к печ. 5/III 1941 г. | Объем 9 1/2 п. л. Уч. а. л. 13,3 | 60 307 зн. в п. л.
Л47574 | Цена 5 руб. | Зак. 38 | Тираж 9.500 экз

13-я тип. ОГИЗ РСФСР, треста «Полиграфкнига», Москва, Денисовский, 30.

Новая измерительная аппаратура с модуляцией частот

Измеритель напряженности поля, тип 301-А.

Модель 301-А измеряет интенсивность поля высокочастотных станций и дает эффективный контроль работы антенных устройств и площади обслуживания станции. При соединении со стандартным регистратором, модель 301-А дает запись вариаций в интенсивности сигналов, а при соединении с шумомером указывает уровень шума любого канала высокой частоты. Диапазон 20-125 мегациклов. Модель 301-А специально сконструирована для применения в эксплуатации.

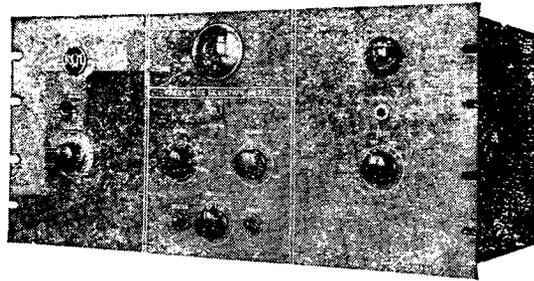


Измеритель отклонений частоты, тип 303-А.

При применении на высокочастотных передатчиках модель 303-А, в связи с частотомером типа 306-А, указывает отклонения несущей частоты с точностью в пределах крайне малых допусков. Показания — в пределах 0,005%. Высокая стабильность частот. Диапазон от 1500 кц. до 50 мц. Интервал отклонений от 5 до 25.000 циклов. Неоновая лампа на панели прибора дает указание чрезмерного отклонения частоты. Установка требует лишь внешних соединений с передатчиком и питанием.

Измеритель искажений, тип 69-В.

Модель RCA 69-В дает возможность точной проверки пропускания частот, уровня шума и искажения гармоник на всех частотах от 50 до 15.000 циклов. Это устраняет наличие неверных данных, часто получаемых при замере искажений только на одной контрольной частоте. Прибор точно измеряет искажения от 0,03% до 100%.



International Division



MANUFACTURING COMPANY, Inc.

CAMDEN, NEW JERSEY, U. S. A.

Филиал фирмы Radio Corporation of America

Цена 5 руб.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МОСКВА, ПРОЕЗД ВЛАДИМИРОВА, 4.

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА на 1941 г.

НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЖУРНАЛЫ

НАЗВАНИЕ ЖУРНАЛОВ	Количество номеров в год	Подписная цена	
		На год	На 6 м-цев
„ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“	12	60 руб.	30 руб.
„ТОРФЯНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ“	6	12 „	6 „
„ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ“	12	54 „	27 „
„ТЕПЛОСИЛОВОЕ ХОЗЯЙСТВО“	12	48 „	24 „
„ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО“	12	48 „	24 „
„ИЗВЕСТИЯ ВСЕСОЮЗНОГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. ДЗЕРЖИНСКОГО“	12	48 „	24 „
„БЮЛЛЕТЕНЬ ВСЕСОЮЗНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА“ (ВЭИ)	12	36 „	18 „
„ИЗВЕСТИЯ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СЛАБОГО ТОКА“	12	48 „	24 „

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ:

отделениями и организаторами подписки „Союзпечать“ на предприятиях, в учреждениях и всюду на почте.

ПОДПИСКУ МОЖНО НАПРАВЛЯТЬ также по адресу: Москва, проезд Владимира, 4, Госэнергоиздат. Расчетный счет № 188002 в Красногвардейском отделении Госбанка.