

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



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

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>За дальнейшее улучшение подготовки электротехнических кадров</i>	3
Н. Ф. Ракушев — Электрические свойства линий электропередачи с расщеплением фаз	7
А. Б. Чернин — Вычисление токов короткого замыкания в электросетях с продольным регулированием напряжения под нагрузкой	13
В. В. Фетисов — Потенциальная кривая на коллекторе и ее влияние на образование кругового огня	25
И. Д. Урусов — Анализ тока статора при гармонически пульсирующем моменте синхронной машины	29
М. С. Левин и П. В. Куц — О сопротивлении нулевой последовательности асинхронных двигателей	37
А. В. Нетушил и А. А. Лисенков — Измерение температур диэлектриков и полупроводников в полях высокой частоты	42
И. И. Иванов — О методике определения водопоглощаемости слоистых пластмасс	45
С. А. Гинзбург — Синтез некоторых нелинейных цепей	48
Г. Е. Пухов — Теория мощности системы периодических многофазных токов	56
Л. М. Закс — Рациональный выбор параметров последовательно-параллельной схемы температурной компенсации милливольтметров	62
<b>ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ</b>	
Б. С. Зубрицкий — Опыт эксплуатации новых быстродействующих выключателей на тяговых подстанциях	68
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
А. Н. Фрумкин и А. Д. Обручева — Работы Б. С. Якоби в области химических источников тока	71
В. Е. Манойлов — Советская научная школа электропривода	74
<b>ДИСКУССИИ</b>	
Об учебнике „Общая электротехника“ под ред. С. А. Пресса — Ф. И. Чернявский, В. К. Балуев, Б. В. Грушевский	75
Электроснабжение промышленных предприятий — С. К. Сурков, П. А. Васильев, Б. Ю. Липкин, В. А. Найдис, А. А. Кулаков, М. М. Соколов, П. Г. Грудинский	77
О мерах повышения коэффициента мощности электроустановок промышленных предприятий — И. А. Сыромятников, П. Г. Грудинский, М. С. Лихачев, Л. В. Литвак, Л. Б. Гейлер	80
<b>ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА</b>	
Трамвай в Днепропетровске пущен в 1897 г. О методике изложения некоторых вопросов в курсах электрических машин и электрического привода	88
<b>ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ</b>	
Местная электроэнергетическая система с дублированием мощности. Экспериментальные данные исследования устойчивости узла нагрузки энергосистемы. Электропередачи постоянного тока высокого напряжения. Трансформатор тока, подмагниченный током повышенной частоты	90
<b>ХРОНИКА</b>	
Учреждение Академии наук в Чехословакии. Открытие Академии наук Корейской Народно-Демократической Республики. Рассыпухинская межколхозная гэс. Золотая медаль имени С. И. Вавилова и премия имени Л. И. Мандельштама. Профессор А. М. Залесский. Профессор М. М. Михайлов. <u>Академик А. А. Андронов</u>	92
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
К. В. Сидоров — Книга В. А. Привезенцева „Обмоточные провода с эмалевой и волокнистой изоляцией“	96
Номограмма для возведения числа в степень больше единицы (на третьей полосе обложки)	



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

**Адрес редакции:** Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К-4-24-80.  
**Адрес для телеграмм:** Москва Электричество.  
**Адрес для корреспонденции:** Москва, Главный почтамт,  
почтовый ящик № 648.

# За дальнейшее улучшение подготовки электротехнических кадров

Выполнение величественных задач, поставленных перед советским народом XIX съездом Коммунистической партии Советского Союза и товарищем Сталиным, требует дальнейшего улучшения подготовки советских электротехнических кадров.

Высшая школа в СССР за годы сталинских пятилеток добилась небывалых успехов. Число студентов в высших учебных заведениях СССР более чем в 1,5 раза превышает число студентов во всех капиталистических странах Европы, вместе взятых. Непрерывно и быстрыми темпами растет прием в высшие учебные заведения и техникумы нашей страны. Из года в год улучшается подготовка инженеров и техников по электротехническим специальностям в таких крупнейших вузах нашей страны, как Московский энергетический, Ленинградский электротехнический и Ивановский энергетический институты, Ленинградский, Киевский, Томский, Харьковский и другие политехнические институты. В них имеются специальности, имеющие огромное значение для дела электрификации народного хозяйства страны.

Подготовка кадров для электрификации ведется не только в электротехнических и политехнических институтах, но и в горно-металлургических, сельскохозяйственных и других высших учебных заведениях и техникумах.

В соответствии с указаниями партии и правительства для удовлетворения требований быстро растущего народного хозяйства советская высшая школа из года в год повышает качество подготовки инженеров-электриков. Нам нужны специалисты, вооруженные техническими знаниями, в то же время хорошо владеющие теорией марксизма-ленинизма, понимающие законы экономического развития социалистического общества, способные творчески осуществлять политику партии и правительства в деле построения коммунистического общества. Нам нужны специалисты, которые могут проявить максимум инициативы, настойчивости, глубокого знания дела при осуществлении задач комплексной электрификации, механизации и автоматизации производственных процессов, при широком внедрении во все отрасли народного хозяйства и строительства новейших достижений науки и техники.

Вопросы подготовки электротехников с высшим образованием должны решаться с учетом перспективы развития народного хозяйства и культуры Советского Союза не только в течение текущей пятилетки, но и на более длительный срок. Начало инженерной деятельности многих

из тех, кто сейчас сидит еще на студенческих скамьях, совпадет с завершением выполнения пятого пятилетнего плана, с окончанием первых сталинских строек коммунизма, с осуществлением директив XIX съезда партии об усилении комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. Следовательно, работники советской высшей школы обязаны смотреть далеко вперед: молодые специалисты должны быть способны не только воспринять новую технику, уже принятую на вооружение в нашей промышленности, в сельском хозяйстве, на транспорте и т. д., но и сразу включиться в ее дальнейшее творческое развитие.

Следует уделить значительно больше внимания вопросам техники дальних электропередач, распределительных устройств, устойчивости электросистем, комплексной механизации электрохозяйства, централизации и автоматизации управления энергосистемами. Если эти вопросы более или менее удовлетворительно решаются в Московском энергетическом и Ленинградском политехническом институтах, то в других вузах им уделяется совершенно недостаточное внимание.

В вузах мало знакомят студентов с вопросами передачи электроэнергии постоянным током. Московский энергетический и Ленинградский электротехнический институты имеют все возможности уже в настоящее время значительно улучшить преподавание этого раздела курса.

Непосредственно связанные со строительством дальних электропередач проблемы электромашино- и электроаппаратостроения все еще не находят достаточного отражения в комплексе знаний, сообщаемых студентам соответствующих специальностей. Плохо обстоит дело с решением одной из насущных задач — с подготовкой кадров по проектированию и строительству статических преобразовательных установок большой мощности.

Особое значение приобретает специальность «Электрификация промышленных предприятий». Электрификация производственных процессов сделалась основным звеном комплексной механизации. Автоматизация производственных процессов в значительной своей части заключается в автоматизации электротехнических установок на предприятиях. Следовательно, на специалистов по электрификации промышленных предприятий возлагается задача проведения любой автоматизации технологических процессов на подавляющем большинстве промышленных предприятий.

При подготовке специалистов для электрификации транспорта следует уделить особое внимание пересмотру содержания курсов, в частности по разделам: централизация и автоматизация управления тяговыми подстанциями, автоматизация управления подвижным составом, автоматические устройства, обеспечивающие безопасность движения. Значительно большее внимание следует уделить проблеме электрификации железных дорог на переменном токе, различным проблемам электрификации городского, промышленного, рудничного транспорта и теплоэлектрической тяги.

Важное значение приобрела специальность «Автоматические и измерительные устройства». Наиболее существенными звеньями в подготовке инженеров такого профиля являются: электрические измерения электрических и неэлектрических величин и теория преобразователей (датчиков) в применении к контролю производственных процессов; автоматическое сопоставление измеряемых величин в электромеханических и электронных устройствах и теория автоматического регулирования и, наконец, электронно-электромагнитные или электромашинные исполнительные механизмы, действующие на непосредственные регуляторы любых производственных процессов. Эта категория специалистов должна создать серию универсальных систем и устройств автоматизации, применимых во всех отраслях народного хозяйства и науки (счетно-решающие устройства). Вместе с тем приходится констатировать, что инженеры для этой чрезвычайно важной области готовятся еще в недостаточных количествах и самый профиль подготовки их еще не вполне установлен.

В системах телемеханизации, централизации и диспетчеризации производства и транспорта электротехнические устройства, как правило, незаменимы. Конечно, существует ряд технологических процессов, механизация и автоматизация которых пойдут по другим путям, но совершенно бесспорно одно: только в самом тесном творческом содружестве технologа и конструктора, электрификатора и автоматизатора могут быть успешно разрешены задачи комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. Известно, например, что механизация и автоматизация требуют часто изменения технологии. Наиболее правильное решение в таких случаях достигается только на базе совместного изучения проблемы с участием технologа и электрика. Поэтому необходимо, чтобы при подготовке инженеров неэлектротехнических специальностей был увеличен объем их электротехнических знаний, освещающих вопросы электрификации и автоматизации соответствующих производств. Это будет содействовать в части кадров наилучшему решению больших задач автоматизации производственных процессов, широко поставленных в директивах XIX съезда партии.

Электротехнической подготовке кадров в неэлектротехнических вузах уделяется до сих пор еще недостаточное внимание как со стороны

главных управлений Министерства высшего образования, так и со стороны главных управлений учебных заведений отраслевых министерств. Многие политехнические институты, имеющие в этом отношении большие возможности, не справляются полностью с этой задачей. Министерство высшего образования в самое ближайшее время должно принять решительные меры к коренному улучшению электротехнической подготовки студентов неэлектротехнических специальностей, а отраслевые министерства должны соответственно дополнить программу подготовки среднего технического состава для своих предприятий и принять меры к повышению квалификации уже дипломированных инженеров и техников.

Помимо этой качественной стороны вопроса подготовки кадров в системе отраслевых министерств, следует отметить недостаточность количества выпускаемых техников-электриков. Нередко имеют еще место случаи использования инженеров на таких работах, с которыми с успехом могли бы справляться техники.

В связи с ростом требований к количеству и качеству подготовки электротехнических кадров перед соответствующими институтами, факультетами и техникумами со всей остротой встали задачи дальнейшего развития и укрепления их материальной базы, комплектования, подготовки и повышения квалификации научно-педагогических кадров, развития научно-исследовательских работ, усиления научно-методической работы, разрешения вопросов производственной и учебной практики, усиления учебно-организационной работы.

С решением этих задач справляются далеко не все институты и техникумы. Московский энергетический институт им. Молотова, инициативный коллектив которого ведет большую научно-методическую и научно-исследовательскую работу, из года в год увеличивает количество и улучшает качество выпускемых специалистов. Но и в этом институте до настоящего времени рост учебно-материальной базы отстает от роста контингента студентов. Не все профессора МЭИ обеспечивают успешную подготовку молодых научно-педагогических кадров. Не соответствует возможностям этого института и рост научно-педагогических кадров высшей квалификации — профессоров и докторов наук по отдельным электротехническим специальностям.

Не вполне удовлетворительно развивается учебно-материальная база Ивановского энергетического института. Недостаточны темпы строительства и расширения старейшего электротехнического вуза — Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина). Задерживается строительство Новосибирского электротехнического института, который должен послужить новым значительным источником подготовки электротехнических кадров, в первую очередь для министерств промышленности средств связи и электропромышленности. Значительно отстает от роста контингента студентов учебно-материальная база электротехнических факультетов

в ряде политехнических институтов и в первую очередь в Челябинском и Дальневосточном.

В укреплении учебно-материальной базы электротехнических вузов и факультетов, оснащении их современным оборудованием большую помощь Министерству высшего образования могли бы оказать министерства электростанций, электропромышленности, промышленности средств связи и некоторые другие. Заслуживает быть отмеченным пример такого содействия со стороны Министерства машиностроения и приборостроения.

Рост научно-педагогических кадров по электротехническим специальностям в некоторых институтах заметно отстает от роста контингентов студентов. Недостаточно укомплектованы научно-педагогическими кадрами электротехников высшей квалификации Челябинский и Дальневосточный политехнические институты и некоторые другие. Необходимо повысить в связи с этим внимание к подготовке докторов и кандидатов наук по электротехническим специальностям. Эта задача должна быть в числе первоочередных не только в системе Министерства высшего образования, но и в энергетических и электротехнических институтах Академии наук СССР и республиканских академий наук, от которых высшая электротехническая школа вправе ожидать эффективной помощи научно-педагогическими кадрами.

Отраслевые научно-исследовательские институты министерств электростанций, электропромышленности и промышленности средств связи, в системе которых проводится подготовка аспирантов, должны также оказать помощь Министерству высшего образования в укомплектовании вузов научно-педагогическими кадрами.

Весьма существенные недостатки имеются и в методической работе, связанной с подготовкой электротехнических кадров. Неоправданно часто пересматриваются учебные планы, что приводит к значительным методическим и организационным трудностям, связанным с работой вузов по переходным планам. Не следует ли Министерству высшего образования создать типовые учебные планы, которые определяли бы профили подготовки специалистов и были бы стабильны по крайней мере в течение 5 лет? Корректиды же, связанные с быстрым развитием отечественной электротехники, можно вносить в программы, не меняя учебных планов.

Наибольшее число инженеров-электриков готовится на энергетических факультетах политехнических институтов, состав которых чрезвычайно разнообразен. Есть случаи, когда на таких факультетах представлены специальности от теплоэнергетических до радиотехнических. Здесь, очевидно, надлежит решить две основные проблемы: во-первых, пересмотреть состав специальностей факультетов и скомплектовать их с точки зрения одинаковости требований общеинженерной подготовки и, во-вторых, предоставить вузам право на основе типовых планов составлять рабочие учебные планы с учетом специфики структуры факультетов.

Несмотря на значительную работу, проделанную в последние годы по изданию учебников и учебных пособий по электротехническим дисциплинам, следует отметить, однако, еще недостаточное издание учебной литературы по таким дисциплинам, как радиотехника, электронная и ионная техника, автоматические и измерительные устройства, электрификация отдельных отраслей народного хозяйства.

Большими недостатками страдают методика и организация учебной практики студентов электротехнических специальностей. Эта практика ограничивается обработкой металлов, причем главным образом — механической. Электротехника в программе этой практики представлена, как правило, только обычной ручной дуговой электросваркой. Даже в таких передовых учебных заведениях, как Московский энергетический и Ленинградский электротехнический институты, до последнего времени не организована практика по электроискровой и электрохимической обработке металлов.

Студентов на электротехнических факультетах не знакомят во время учебной практики с современными методами высокочастотной закалки металлов, ультразвуковой дефектоскопией и т. п. Отсутствуют в программах учебной практики вопросы технологии электрического монтажа, ремонта электрических машин и аппаратов, изготовления простейших электрических приборов и установок. В результате студенты электротехнических специальностей отправляются на первую производственную практику совершенно неподготовленными к практической работе по электротехнике. Вузам, ведущим подготовку инженеров-электриков, надо обеспечить проведение электротехнической учебной практики студентов так, чтобы на первую производственную практику они приходили, имея практические навыки в электромонтажных и электроремонтных работах.

Имеются недостатки и в проведении производственной практики. Главную долю вины за это следует отнести за счет соответствующих промышленных министерств, работники которых, ведающие организацией практики студентов, часто подходят к этому важнейшему вопросу узко ведомственно. Часто такие работники не хотят позаботиться об обеспечении возможности большинству будущих инженеров пройти практику на передовых предприятиях, с тем чтобы практиканты, будучи по окончании вуза направлены даже и на другие предприятия страны, принесли с собой туда достижения лучших предприятий с их передовой технологией, передовыми методами организации труда и т. д.

Основой успешной работы по подготовке электротехнических кадров в высших учебных заведениях является глубокая и непрерывная научно-исследовательская деятельность профессорско-преподавательского коллектива. Эта сторона деятельности является основным показателем качества работы института, факультета, кафедры. Там, где ученые института ведут большую научную работу, решают важнейшие народнохозяй-

ственные проблемы, умеют смотреть далеко вперед, будучи тесно связаны с промышленностью, опережают промышленность в своих работах и указывают ей пути совершенствования производства, — там успешно и быстро растут научно-педагогические кадры, интересно читаются лекции и проводятся лабораторные занятия, там учебники и учебные пособия составляются на основе новейших достижений науки и производства, там студенты вместе с учеными работают над решением народнохозяйственных задач и дипломные проекты имеют практическое народнохозяйственное применение, а молодые инженеры выходят хорошо подготовленными. Решением многих важнейших электротехнических проблем наряду с академическими институтами и отраслевыми научно-исследовательскими институтами успешно занимаются научные коллективы Московского энергетического, Ленинградского электротехнического институтов и ряд электротехнических кафедр Ленинградского, Львовского, Киевского, Харьковского и Томского политехнических институтов. Однако объем и значимость научных работ по электротехнике в отдельных вузах совершенно еще недостаточны.

Старым и, к сожалению, все еще имеющим место недостатком в организации научно исследовательских работ является относительная разобщенность научных коллективов, работающих над общими народнохозяйственными проблемами. Важные проблемы, связанные с великими стройками коммунизма, с комплексной электрификацией и автоматизацией народного хозяйства, иногда решаются отдельными научными коллективами обособленно, без налаженного взаимодействия, без должного обмена мнений. Стремление некоторых организаций решать важные вопросы науки автономно, ограничиваясь лишь внутренни-

ми силами, без привлечения крупнейших ученых, имеющихся в наших вузах, — явно неправильное и вредное. Могут быть различные научные школы и направления — в этом есть свое преимущество, так как подлинная наука рождается в борьбе мнений. Но с разобщенностью и изоляционизмом в науке, которые ничего, кроме вреда, не приносят, необходимо вести решительную борьбу.

Немалым препятствием в обмене мнений между научными работниками вузов являются трудности, существующие в части издательской деятельности вузов, труды которых издаются от случая к случаю. В то же время отраслевые издательства не уделяют должного внимания изданию научных трудов институтов.

Все еще большие отставания имеются в подготовке аспирантов по электротехническим специальностям. До последнего времени план приема аспирантов по электротехническим специальностям, особенно по электровакуумной технике, автоматике и телемеханике, электроприборостроению и радиотехнике, выполнялся неполностью. Значительное количество аспирантов этих специальностей заканчивает аспирантуру без защиты диссертаций или защищает их со значительным опозданием.

Устранение всех отмеченных выше недостатков в области подготовки новых молодых инженерных и научных электротехнических кадров является неотложной задачей, которой должно быть уделено большое внимание.

Работа по дальнейшему улучшению дела подготовки электротехнических кадров — боевая задача, выполнение которой необходимо в целях успешного претворения в жизнь исторических решений XIX съезда партии, в интересах нашего дальнейшего уверенного продвижения вперед по пути к коммунизму.



# Электрические свойства линий электропередачи с расщеплением фаз

Кандидат техн. наук Н. Ф. РАКУШЕВ

Куйбышевский индустриальный институт им. Куйбышева

Вопрос о практической целесообразности применения расщепленных фаз для повышения пропускной способности линий электропередачи

был впервые рассмотрен в 1925 г. Л. Е. Машкиллем [Л. 1], который вывел уравнения для расчета емкости и индуктивности при расщеплении фаз на два провода. Полученные уравнения он проверил на опытной установке. Между вычисленными величинами емкости и индуктивности и полученными из опыта выявилось значительное расхождение, объясняющееся несовершенством предложенных уравнений.

Некоторые сведения содержатся в работе Г. Маркта и Б. Менгеле [Л. 2], появившейся в 1932 г. Однако здесь вопрос рассматривался лишь с точки зрения повышения пропускной способности линий электропередачи 220 кв.

У нас в Советском Союзе вопрос о применении расщепленных проводов на линиях 220 кв впервые был рассмотрен в 1936 г. А. А. Глазуновым и Л. А. Солдаткиной [Л. 5], которые изучали не только электрические, но также механические и экономические характеристики линий с расщепленными проводами.

В 1938 г. вопрос о расщеплении проводов применительно к линиям 220, 380 и 400 кв был рассмотрен Г. М. Розановым.

В настоящее время расщепление фаз, как одно из главных средств, позволяющих осуществить дальнюю электропередачу, общепризнано. В связи с этим представляют интерес общие способы определения электрических свойств линий электропередачи с расщепленными проводами.

Если в каждой фазе линии одиночный провод заменить несколькими, работающими параллельно, то индуктивность фазы уменьшится, а ее емкость увеличится. При этом линия по своему устройству останется однородной на всем своем протяжении. Скорость распространения электромагнитных волн не изменится и приближенно (без учета утечки и активного сопротивления) определится как

$$v = v_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 300000 \text{ км/сек},$$

где  $L$  — индуктивность линии на единицу длины;  $C$  — емкость линии на единицу длины.

Рассматриваются электрические свойства линий, имеющих расщепление фазы. Приводятся уравнения, позволяющие определить емкость, индуктивность, волновое сопротивление и критическое напряжение короны линий электропередачи с фазами, расщепленными на любое число проводов.

В технических расчетах значения емкости и индуктивности проводов обычно вычисляются с различными допущениями. Найденная по этим

значениям скорость распространения электромагнитных волн может отличаться от только что приведенной величины на 3...5% в сторону увеличения.

Как уже указывалось, при расщеплении проводов емкость линии возрастает, а индуктивность уменьшается. Следовательно, волновое сопротивление линии с расщеплением фаз снижается, а ее естественная мощность увеличивается. Волновое сопротивление после расщепления

$$z_{B_2} = \sqrt{\frac{L}{\frac{w}{Cw}}} = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{w} z_{B_1}, \quad (1)$$

однако на практике в интересах большей точности вычисления волновое сопротивление не принято определять на основании отношения индуктивности к емкости, так как эти величины, как уже указывалось, определяются по упрощенным формулам.

**Электрические характеристики расщепленных проводов.** Емкость пучка из  $n$  проводов может быть вычислена с помощью обычных формул, если ввести в них действующий радиус пучка, определяемый из уравнения

$$r_\partial = r_0^{\frac{1}{n}} d_m^{\frac{n-1}{n}}, \quad (2)$$

где  $r_0$  — радиус провода, а  $d_m$  — среднегеометрическое расстояние между проводами в пучке. Тогда емкость ( $мкФ/км$ )

$$C = \frac{0,0241}{\frac{D_m}{\lg \frac{D_m}{r_\partial}}}. \quad (3)$$

Индуктивность одной фазы трехфазной линии с расщепленными проводами ( $гн/км$ ) может быть найдена на основании уравнения

$$L = \left( 2 \ln \frac{D_m}{r_\partial} + \frac{0,50}{n} \right) 10^{-4}. \quad (4)$$

Индуктивность трехфазной линии с одиночными проводами ( $гн/км$ )

$$L = \left( 2 \ln \frac{D_m}{r_0} + 0,50 \right) 10^{-4}. \quad (4')$$

Таким образом, уравнение (4) отличается от уравнения (4') наличием действующего радиуса  $r_0$  и уменьшенным в  $n$  раз свободным членом. Через  $D_m$  обозначено среднегеометрическое расстояние между фазами.

Как известно, волновое сопротивление

$$z_B = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}}. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что, уменьшая в результате расщепления рабочую индуктивность и увеличивая рабочую емкость каждой из фаз, мы как бы осуществляем компенсацию волнового сопротивления линии.

Принимаем скорость распространения электромагнитных волн

$$v = v_0 = 300\,000 \text{ км/сек.}$$

Тогда

$$z_B = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{L}{VLC} = L v_0 = 300\,000 L. \quad (6)$$

После подстановки в уравнение (6) вместо  $L$  выражения (4') получим:

$$z_B = 60 \ln \frac{D_m}{r_0} + 15. \quad (7)$$

Волновое сопротивление линии, фазы которой расщеплены на  $n$  проводов,

$$z_B = 138 \ln \frac{D_m}{r_0} + \frac{15}{n}. \quad (7')$$

Как известно, естественная мощность линии

$$P_H = \frac{U^2}{z_B}. \quad (8)$$

Следовательно, уменьшение волнового сопротивления позволяет увеличить естественную

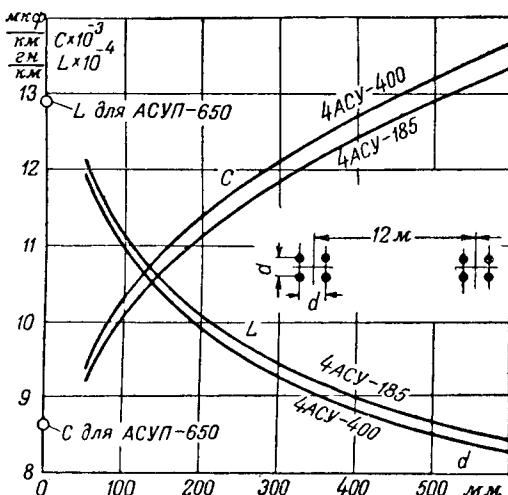


Рис. 1. Изменение емкости и индуктивности трехфазной линии 400 кВ с расщеплением фаз в зависимости от шага расщепления.

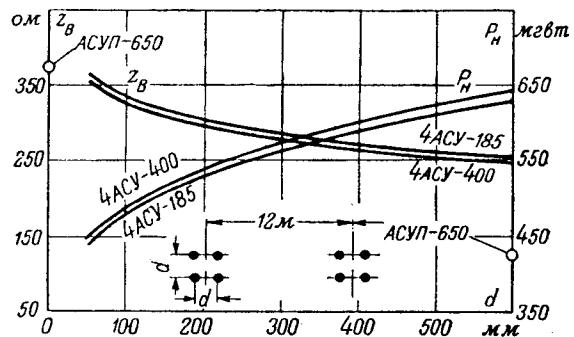


Рис. 2. Изменение волнового сопротивления и естественной мощности трехфазной линии 400 кВ с расщеплением фаз в зависимости от шага расщепления.

мощность линии. Но ввиду того, что волновое сопротивление зависит главным образом от величины  $\ln \frac{D_m}{r_0}$ , добиться этим путем более или менее значительного увеличения естественной мощности невозможно.

В качестве примера на рис. 1 показано изменение индуктивности и емкости, а на рис. 2 – волнового сопротивления и естественной мощности линии напряжением 400 кВ без расщепления и с расщеплением фаз. В последнем случае каждая фаза линии расщеплена на четыре провода марки АСУ разного сечения, расположенных по вершинам квадрата со стороной (шагом расщепления)  $d$ , изменяющимся от 50 до 600 мм.

Из рис. 1 и 2 видно, что марка проводов, иначе говоря, их радиус, мало влияет на емкость и индуктивность линии. Гораздо большее влияние оказывает шаг расщепления  $d$ . Ввиду этого параметры линий с расщеплением фаз следует регулировать путем выбора надлежащей величины шага расщепления, а не за счет увеличения общего сечения фазы, которое не должно превышать необходимого по условиям наивыгоднейшей плотности тока или коронирования.

Увеличение общего сечения фазы приводит к перерасходу цветного металла, но не дает сколько-нибудь существенного прироста естественной мощности. В противоположность этому увеличение числа проводов в расщепленной фазе довольно заметно сказывается на естественной мощности. Однако и эта возможность увеличения последней ограничивается тем, что рост числа проводов в фазе приводит к усложнению конструкции и удорожанию линии. Как видно из рис. 3, переход от четырех проводов АСУ-300 к шести проводам АСУ-240 дает прирост естественной мощности всего на 15%, в то время как общее сечение фазы увеличивается в 1,2 раза и линия в конструктивном отношении сильно усложняется. При переходе от линии без расщепления фаз, имеющей провод диаметром 50 мм, к линии с фазами, расщепленными на 4 провода АСУ-300, естественная мощность увеличивается в 1,52 раза, а при переходе к линии с фазами, расщепленными на

6 проводов АСУ-240, в 1,74 раза. В итоге сравнительно скромное увеличение естественной мощности покупается довольно большой ценой. Поэтому на практике расщеплять фазу более чем на 4 провода мало целесообразно.

**Действующий радиус пучка.** Как следует из сказанного выше, все электрические свойства линии с расщепленными проводами определяются действующим радиусом фазы  $r_o$  (2).

Если неограниченно увеличивать число проводов  $n$  в пучке, то действующий радиус будет стремиться к некоторому пределу:

$$\text{Пред} [r_o]_{n \rightarrow \infty} = \text{Пред} \left[ r_0^{\frac{1}{n}} d_m^{\frac{n-1}{n}} \right]_{n \rightarrow \infty} = d_m. \quad (9)$$

При достаточно большом числе проводов в пучке действующий радиус его приближается к среднему геометрическому расстоянию между проводами расщепленной фазы.

Радиусы проводов от АСУ-150 до АСУ-400 мало отличаются от единицы. Поэтому даже при малом числе проводов в фазе влияние радиуса провода на действующий радиус пучка невелико.

Для того чтобы при наименьшем количестве проводов в пучке получить наибольший действующий радиус, провода расщепленной фазы следует располагать по вершинам правильного многоугольника. Это позволяет наилучшим образом использовать объем, занимаемый пучком, а также дает наиболее выгодную конфигурацию электрического и магнитного полей пучка. При таком расположении проводов форма полей пучка ближе всего подходит к формам полей одного провода, радиус которого равен действующему радиусу пучка  $r_o$ .

Итак, наиболее существенной величиной в расщепленной фазе является среднее геометрическое расстояние между проводами пучка.

**Критическое напряжение короны.** В наиболее употребительном виде уравнение для определения фазного критического напряжения короны при нерасщепленных проводах выглядит следующим образом:

$$U_0 = 21,2 m_1 m_2 \delta r_0 \ln \frac{D_m}{r_0}; \quad (10)$$

здесь 21,2 — критический градиент короны,  $\text{kV/cm}$ ;

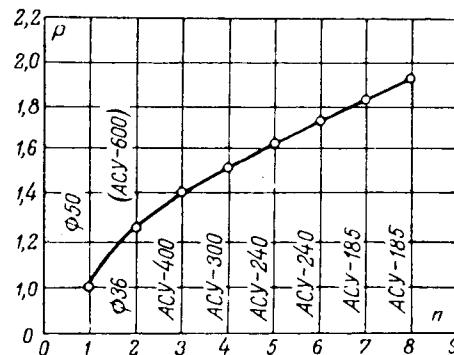


Рис. 3. Изменение естественной мощности трехфазной линии 400 кВ в зависимости от числа проводов в расщепленной фазе.  $D = 12 \text{ м}$ ,  $d = 500 \text{ мм}$ .

$m_1$  — коэффициент, учитывающий состояние поверхности провода, или коэффициент шероховатости;

$m_2$  — коэффициент, учитывающий состояние погоды;

$$\delta = \frac{3,92}{273+t^\circ} b \text{ — относительная плотность воздуха.}$$

При небольшом расстоянии между проводами, на которые расщеплены фазы линии, электрическое поле вокруг пучка становится более благоприятным в отношении наступления короны. В этом случае пучок приближается к одиночному проводу, но более значительного диаметра. Ввиду этого критическое напряжение короны у расщепленной фазы линии будет лежать выше, чем у фазы с одиночным проводом. На рис. 4 представлена картина электрического поля для разных случаев расщепления [Л. 4], но при сохранении неизменным общего сечения пучка.

Рассмотрим фазу линии электропередачи, расщепленную на два провода (рис. 5). Как видно из рис. 4, наибольшее сгущение линий электрического поля имеет место на внешней стороне проводов пучка. Здесь, следовательно, и будет наибольшая напряженность электрического поля. Чтобы определить критическое напряжение короны, необходимо найти напряженность поля  $E$  в крайних точках  $A$  и  $B$  обоих проводов. Если, как это обычно бывает, оба провода имеют одинаковый радиус  $r_0$ , то напряженности  $E_A$  и  $E_B$  будут равны между собой. Поэтому достаточно определить одну из них.

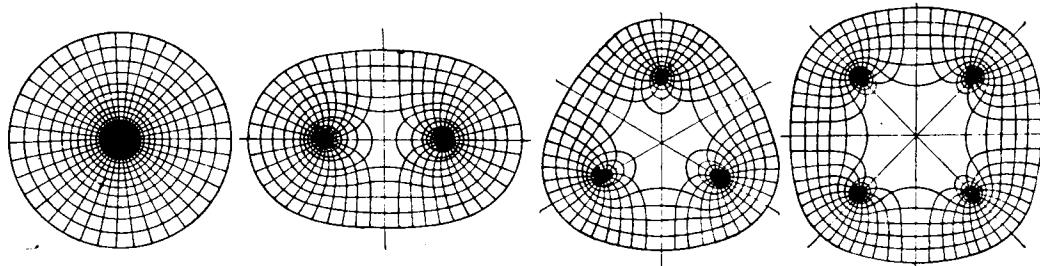


Рис. 4. Картина электрического поля при разных случаях расщепления фаз. Во всех случаях сечение фазы и шаг расщепления одинаковы,  $d = 45 \text{ см}$ ,  $D = 9,6 \text{ м}$ . Диаметры проводов: 1  $\times$  50,8  $\text{мм}$ ; 2  $\times$  35,9  $\text{мм}$ ; 3  $\times$  29,3  $\text{мм}$ ; 4  $\times$  25,4  $\text{мм}$ .

Напряженность электрического поля провода 1 на его поверхности (точка A, рис. 5)

$$E_1 = 2\sigma \frac{1}{r_0} K_\epsilon, \quad (11)$$

где  $\sigma$  — поверхностная плотность электрических зарядов, а  $K_\epsilon = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ .

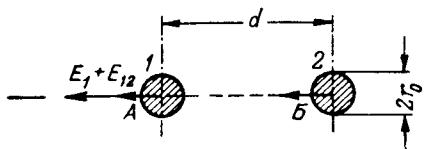


Рис. 5.

Напряженность поля провода 2 в точке A

$$E_{12} = 2\sigma \frac{1}{d + r_0} K_\epsilon. \quad (12)$$

Вследствие того, что напряженности  $E_1$  и  $E_{12}$  совпадают по направлению, общая напряженность в точке A

$$\begin{aligned} E_A &= E_1 + E_{12} = 2\sigma \frac{1}{r_0} K_\epsilon + 2\sigma \frac{1}{d + r_0} K_\epsilon = \\ &= 2\sigma \frac{1}{r_0} \left( \frac{d}{d + r_0} + \frac{2r_0}{d + r_0} \right) K_\epsilon. \end{aligned} \quad (13)$$

По конструктивным соображениям шаг расщепления берется в 25...30 раз больше радиуса провода  $r_0$ . Поэтому величиной  $r_0$  можно пренебречь и положить:

$$d + r_0 \approx d.$$

Тогда

$$E_A = 2\sigma \frac{1}{r_0} \left( 1 + 2 \frac{r_0}{d} \right) K_\epsilon. \quad (14)$$

Двучлен, стоящий в скобках, можно рассматривать как сумму двух частных напряженностей, выраженных в некоторых условных единицах.

Уравнение (14) является основным для вычисления напряженности электрического поля. Если в пучке имеется  $n$  проводов, расположенных любым образом, то напряженность электрического поля на поверхности первого провода

$$\begin{aligned} E &= 2\sigma \frac{1}{r_0} \left( 1 + 2 \frac{r_0}{d_{12}} + 2 \frac{r_0}{d_{13}} + \dots + 2 \frac{r_0}{d_{1n}} \right) K_\epsilon = \\ &= 2\sigma \frac{1}{r_0} \left[ 1 + 2r_0 \sum_{k=2}^{k=n} \frac{\cos(1k)}{d_{1k}} \right] K_\epsilon = \\ &= 2\sigma \frac{1}{r_0} \left( 1 + \Psi \frac{r_0}{d} \right) K_\epsilon. \end{aligned} \quad (15)$$

Черточка над слагаемыми показывает, что берется проекция каждой частной напряженности на направление, принятое для напряженности первого провода. В соответствии с этим

$$\Psi = 2 \sum_{k=2}^{k=n} \frac{\cos(1k)}{d_{1k}^*}; \quad (16)$$

здесь  $1k$  — угол между направлением напряженности электрического поля первого провода и линией, соединяющей центры провода 1 и провода  $k$ ;

$d_{1k}^* = \frac{d_{1k}}{d}$  — относительное расстояние между проводами 1 и  $k$ , выраженное через шаг расщепления  $d$ .

Если провода расщепленной фазы расположены по вершинам правильного многоугольника:

$$\Psi = 2(n-1) \sin \frac{\pi}{n}. \quad (17)$$

При неограниченном возрастании числа проводов в пучке  $\Psi$  стремится к некоторому пределу

$$\Psi_{\max} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[ 2(n-1) \sin \frac{\pi}{n} \right] = 2\pi = 6,28.$$

Как видно из рис. 6, коэффициент  $\Psi$  довольно быстро приближается к своему пределу и уже при  $n=8$  достигает 85,5% своей наибольшей величины.

Если напряженность электрического поля на поверхности наиболее невыгодно расположенного провода известна, можно найти критическое напряжение короны. Допустим, что фазы линии электропередачи расщеплены на  $n$  проводов. Тогда емкость фазы

$$C = n \frac{\sigma}{U_{cp}}.$$

В нашем случае среднее напряжение будет равно фазному, так что

$$C = n \frac{\sigma}{U_\phi},$$

а электрический заряд

$$\sigma = \frac{1}{n} U_\phi C.$$

После подстановки этого значения заряда в уравнение (15) найдем:

$$E_1 = 2 \frac{1}{n} U_\phi C \frac{1}{r_0} \left( 1 + \Psi \frac{r_0}{d} \right) K_\epsilon,$$

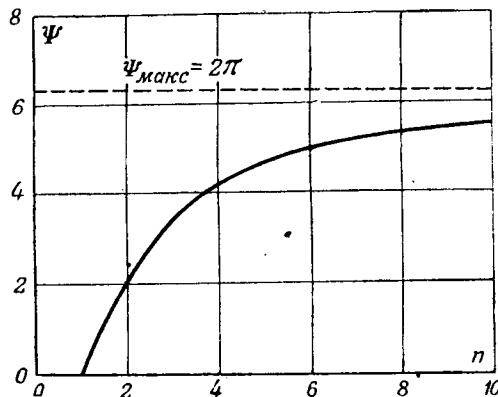


Рис. 6. Изменение коэффициента  $\Psi$  в зависимости от числа проводов в пучке при расположении их по вершинам правильного многоугольника.

откуда

$$U_\phi = \frac{1}{2} E_1 \frac{n}{1 + \Psi \frac{r_0}{d}} r_0 \frac{1}{CK_e}.$$

Предельное допустимое рабочее напряжение линии не должно превышать критического напряжения короны. Поэтому

$$U_\phi = U_0.$$

С другой стороны, емкость на единицу длины одной расщепленной фазы

$$C = \frac{1}{2K_e \ln \frac{D_m}{r_\partial}}.$$

Следовательно, критическое напряжение короны относительно нейтрали для линии, каждая фаза которой расщеплена на  $n$  проводов,

$$U_0 = E_1 \frac{n}{1 + \Psi \frac{r_0}{d}} r_0 \ln \frac{D_m}{r_\partial}. \quad (18)$$

Если же учесть атмосферные условия, шероховатость и принять во внимание, что для воздуха  $E_1 = 21,2 \text{ кВ/см}$ , то уравнение (18) можно написать в следующем виде:

$$U_0 = 21,2 m_1 m_2 \delta \frac{n}{1 + \Psi \frac{r_0}{d}} r_0 \ln \frac{D_m}{r_\partial}. \quad (19)$$

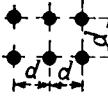
Уравнение (19) отличается от уравнения (10) наличием члена  $\frac{n}{1 + \Psi \frac{r_0}{d}}$  и тем, что под знаком

логарифма в знаменателе стоит действующий радиус пучка, который значительно больше радиуса отдельного провода. Поэтому

$$\ln \frac{D}{r_\partial} < \ln \frac{D}{r_0}.$$

Но это уменьшение с избытком перекрывается возрастанием критического напряжения вследствие наличия члена

$$\frac{n}{1 + \Psi \frac{r_0}{d}}.$$

Число проводов в пучке $n$	1	2	3	3				4	5	6	7	8	6
Расположение проводов в фазе	Горизонтальное			В виде правильного треугольника									
													
$d_m^* = \frac{d_m}{d}$	0	1	1,26	1	1	1	1	1,12	1,27	1,43	1,60	1,76	1,34
$\Psi$	0	2	3	3	3	$2\sqrt{3}$	$3\sqrt{2}$	4,70	5	5,20	5,36		4,8

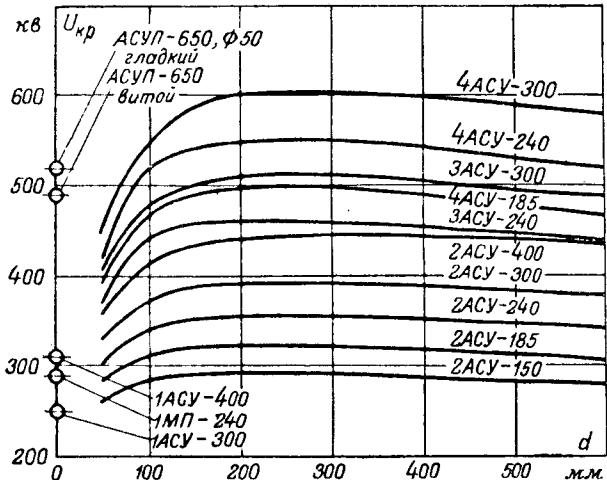


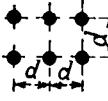
Рис. 7. Зависимость критического напряжения короны трехфазной линии 400 кВ от шага расщепления для разного числа проводов в расщепленной фазе. Фазы расположены в одной горизонтальной плоскости.  $D = 11,0 \text{ м}$ ;  $m_1 = 0,85$  (витой провод) и  $0,90$  (гладкий провод);  $m_2 = 1$ ;  $\delta = 1$ .

В таблице приведены значения коэффициента  $\Psi$ , а также среднегеометрического расстояния между проводами в пучке (в относительных единицах) для различных случаев расщепления фаз. Чтобы получить истинное значение  $d_m$ , нужно табличную величину  $d_m^*$  умножить на шаг расщепления  $d$ . Из трех значений  $\Psi$ , которые даны в таблице для расположения проводов правильным треугольником, первые два получены из уравнения (16), а третье — из уравнения (17).

При нерасщепленной фазе  $\Psi = 0$ , так как в этом случае можно себе представить, что все остальные провода пучка удалены в бесконечность, т. е. в уравнении (16)  $d_{ik}^* = \infty$ .

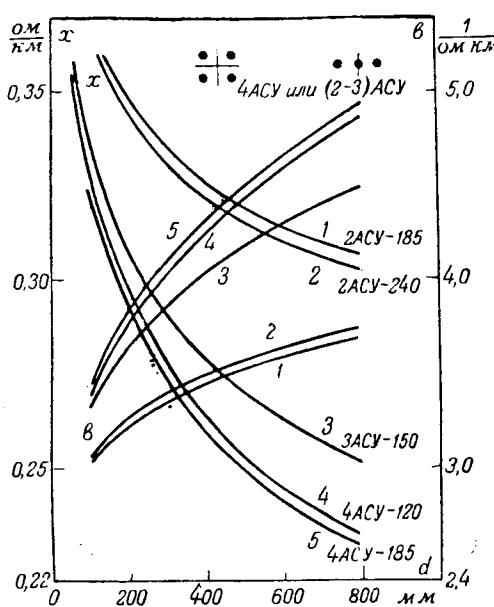
Наглядное представление о поведении линий 400 кВ с расщепленными фазами в отношении критического напряжения короны дает рис. 7, на котором показана зависимость

$$U_0 \sqrt{3} = f(d, n).$$

Число проводов в пучке $n$	1	2	3	3				4	5	6	7	8	6
Расположение проводов в фазе	Горизонтальное			В виде правильного треугольника									
													
$d_m^* = \frac{d_m}{d}$	0	1	1,26	1	1	1	1	1,12	1,27	1,43	1,60	1,76	1,34
$\Psi$	0	2	3	3	3	$2\sqrt{3}$	$3\sqrt{2}$	4,70	5	5,20	5,36		4,8

Примечания: 1. Сторона правильных  $n$ -угольников принята равной шагу расщепления  $d$ .

2. Если при расположении проводов, приведенном в последней графе таблицы, вектор напряженности направлен по диагонали прямоугольника, то  $\Psi = 5,81$ . Если же прямоугольник проводов повернуть на  $90^\circ$ , а вектор напряженности электрического поля направить по горизонтали, то  $\Psi = 4,0$ .



Критическое междуфазное напряжение короны ( $kV$ )

$$U_{kp} = 580 \frac{m_1 m_2 \delta r_0 n}{1 + 100 \frac{\Psi}{D} \frac{\alpha}{r_0}} \left( x - \frac{0,016}{n} \right). \quad (24)$$

Здесь для средних условий знаменатель приблизительно равен 1,10, а  $m_1 m_2 \delta \approx 0,78$ . Поэтому для предварительной оценки получаем:

$$U_{kp} \approx 412 n r_0 \left( x - \frac{0,016}{n} \right) \approx 400 n r_0 x. \quad (25)$$

Для однофазной линии в уравнении (21) коэффициенты 1,26 и 126 необходимо заменить соответственно на 1,0 и 100, а  $U_{kp}$ , полученное из уравнения (24), умножить на  $2/\sqrt{3}$ .

◆ ◆ ◆

## Вычисление токов короткого замыкания в электросетях с продольным регулированием напряжения под нагрузкой

Кандидат техн. наук, доц. А. Б. ЧЕРНИН

Теплоэлектропроект

Для электросистем с дальными электропередачами приобретает большое значение регулирование напряжения под нагрузкой, осуществляющее с помощью специальных устройств, содержащих добавочные трансформаторы [Л. 1, 2 и 3].

Примеры схем включения устройств для продольного регулирования под нагрузкой, т. е. регулирования напряжения по величине, показаны на рис. 1. Сами устройства состоят из двух каскадно включенных трансформаторов: регулировочного и добавочного.

На схеме рис. 1,а показан регулировочный трансформатор, выполненный в виде автотрансформатора; его первичная обмотка соединена в треугольник и питается от шин низшего напряжения подстанции, а вторичная снабжена ответвлениями для регулирования напряжения, подводимого к первичной обмотке добавочного трансформатора, включенной в звезду. Вторичная обмотка добавочного трансформатора также соединена в звезду и включена последовательно с обмоткой высшего напряжения основного трансформатора со стороны нулевых ее выводов.

Регулировочный трансформатор, показанный на схеме рис. 1,б, питается непосредственно от сети, в которой регулируется напряжение, а вторичная обмотка добавочного трансформатора включена в рассечку линии.

Укажем в заключение, что все приведенные в настоящей работе уравнения получены в том предположении, что  $d \leq 0,1D$  (т. е.  $\alpha \leq 10\%$ ) и обеспечена электрическая симметрия трехфазной линии посредством транспозиции фаз.

### Литература

1. Л. Е. Машкиллесон. Расщепление проводов линий электропередачи. Электричество, № 3, 1925.
2. G. Markt und B. Mengel. El. und Maschinenbau, № 50, 1932.
3. П. С. Жданов, В. А. Веников, Г. М. Розанов. Электропередача 400 кв переменного тока. Электричество, № 11, 1949.
4. Tomoshok. El. Eng., № 3, 1949.
5. А. А. Глазунов и Л. А. Солдаткина. Линии электропередачи с расщепленными проводами. Сборник статей по вопросам электроэнергетики, № 10, изд. МЭИ, 1936.

[13. 6. 1952]

◆ ◆ ◆

Кандидат техн. наук, доц. А. Б. ЧЕРНИН

Теплоэлектропроект

Изложены основные принципы вычисления токов при коротких замыканиях в электрических сетях, содержащих добавочные трансформаторы для регулирования напряжения. Даны методы вычисления, базирующиеся на применении соотношений для четырехполюсников и эквивалентных схем. Разработаны схемы замещения трансформаторов при регулировании напряжения на одной из их сторон с помощью добавочных трансформаторов. Приведены примеры вычисления токов короткого замыкания.

Регулирование напряжения в схемах рис. 1 может быть положительным или отрицательным. В первом случае напряжение на выводах добавочного трансформатора совпадает с напряжением цепи, в которой производится регулирование, а во втором — противоположно ему.

Следует отметить, что в ряде случаев вторичная обмотка добавочного трансформатора включается не так, как это показано на схеме рис. 1,а, а в рассечку со стороны линейных выводов вторичной обмотки основного трансформатора.

В связи с применением регулирующих устройств возникает необходимость в вычислении токов, имеющих место при повреждениях внутри и вне этих устройств. Знание токов повреждений необходимо главным образом для целей релейной защиты. В настоящей статье изложены методы вычисления токов повреждений в схемах рис. 1 при продольном регулировании под нагрузкой<sup>1</sup>. В основу этих методов положен принцип наложения нагрузочных токов, имевших место до появления повреждения, на аварийные токи, возникающие при коротком замыкании [Л. 4].

<sup>1</sup> Методика вычисления токов повреждения при продольно-поперечном регулировании подлежит отдельному рассмотрению.

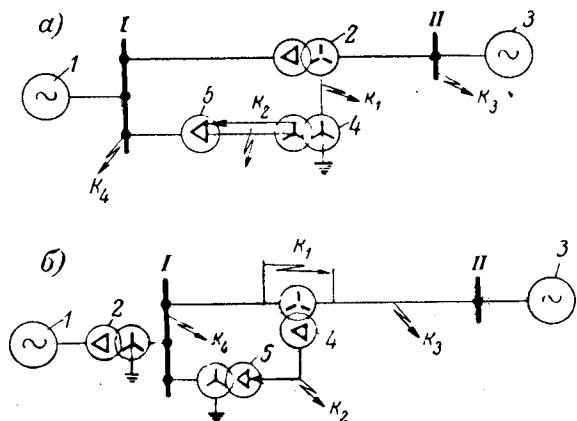


Рис. 1. Схемы включения устройств для продольного регулирования напряжения под нагрузкой. а—добавочный трансформатор включен со стороны нулевых выводов основного трансформатора; б—добавочный трансформатор включен в рассечку линии.

1—станция; 2—основной трансформатор; 3—система; 4—добавочный трансформатор; 5—регулировочный трансформатор.

Применение принципа наложения дает возможность не усложнять вычисление аварийных токов введением в схемы замещения составляющих положительной последовательности э. д. с. отдельных генераторов, обычно различающихся по величине. Принцип наложения позволяет также более точно учитывать нагрузочные токи (включая их активные слагающие) по рассчитанному предшествующему нагрузочному режиму. Вычисление аварийных токов может производиться приближенно по схемам замещения, в которых учтены лишь реактивные сопротивления.

Токи короткого замыкания рассматриваются для точек  $K_1$  и  $K_2$  (внутренние короткие замы-

кания) и для точек  $K_3$  и  $K_4$  (внешние короткие замыкания) схем, представленных на рис. 1.

**Вычисление токов повреждений с помощью соотношений для четырехполюсников.** Имеющиеся в схемах рис. 1 трансформаторные цепи со стороны первичного и вторичного напряжений соединены между собой каскадно, а также последовательно и параллельно. В связи с этим при вычислении токов короткого замыкания возникает необходимость в приведении этих схем к простейшему виду.

Трансформаторные цепи можно рассматривать как четырехполюсники. Это дает возможность с помощью несложных операций над уравнениями, связывающими напряжения и токи обеих сторон четырехполюсников [Л. 5], привести схемы рис. 1 к простейшему виду.

Напряжения трансформатора (рис. 2) могут быть выражены через его токи и сопротивления следующим образом:

$$U_1 = Z_{11} I_1 - Z_{12} I_{11} \quad (1)$$

$$U_{11} = -Z_{21} I_1 + Z_{22} I_{11}, \quad (2)$$

где

$$Z_{11} = Z_{T1} + \frac{Z_\mu}{n^2}; \quad Z_{111} = Z_{T11} = \frac{Z_\mu}{n};$$

$$Z_{111} = Z_{T11} + Z_\mu. \quad (3)$$

В выражениях (3)  $Z_{T1}$  и  $Z_{T11}$ —сопротивления рассеяния отдельных обмоток, а  $Z_\mu$ —сопротивление намагничивания, приведенное к стороне II трансформатора;  $n = \frac{w_{II}}{w_1}$ —коэффициент трансформации. Знаки перед отдельными членами уравнений (1) и (2) соответствуют принятым на рис. 2 направлениям токов и напряжений.

Коэффициенты уравнений (1) и (2) образуют матрицу сопротивления  $Z_T$ :

$$Z_T = \begin{vmatrix} \left( Z_{T1} + \frac{Z_\mu}{n^2} \right) & -\frac{Z_\mu}{n} \\ -\frac{Z_\mu}{n} & \left( Z_{T11} + Z_\mu \right) \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Уравнения (1) и (2) используются при последовательном соединении нескольких трансформаторных четырехполюсников. Например, для двух последовательно соединенных трансформаторных четырехполюсников<sup>2</sup> с сопротивлениями  $Z'_T$  и  $Z''_T$  (рис. 3) в результате сложения этих сопротивлений получим:

$$Z_T = \begin{vmatrix} \left[ Z'_{T1} + \frac{Z'_\mu}{(n')^2} + Z''_{T1} + \frac{Z''_\mu}{(n')^2} \right] & -\left( \frac{Z'_\mu}{n'} + \frac{Z''_\mu}{n''} \right) \\ -\left( \frac{Z'_\mu}{n'} + \frac{Z''_\mu}{n''} \right) & \left( Z'_{T11} + Z'_\mu + Z''_{T11} + Z''_\mu \right) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_T & -R_T \\ -R_T & S_T \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Следует отметить, что при  $n' = n''$  результирующий четырехполюсник представляет собой трансформатор с коэффициентом трансформации  $n = n' = n''$  и сопротивлениями, равными сумме сопротивлений отдельных трансформаторов. При  $n' \neq n''$  результирующий четырехполюсник не обладает свойствами трансформатора, но он может быть представлен Т-образной или П-образной эквивалентной схемой.

При параллельном соединении нескольких трансформаторных четырехполюсников используются следующие уравнения, получающиеся в результате решения уравнений (1) и (2) относительно токов  $I_1$  и  $I_{11}$ :

<sup>2</sup> Этот случай представляет интерес для исследования некоторых устройств релейной защиты.

$$I_1 = Y_{11} \dot{U}_1 + Y_{12} \dot{U}_2, \quad (6)$$

$$I_2 = Y_{21} \dot{U}_1 + Y_{22} \dot{U}_2. \quad (7)$$

Коэффициенты уравнений (6) и (7) образуют матрицу проводимости  $Y$ :

$$Y = \frac{1}{Z_{T1}(Z_{T2} + Z_\mu) + \frac{Z_{T2}Z_\mu}{n^2}} \begin{vmatrix} (Z_{T2} + Z_\mu) & \frac{Z_\mu}{n} \\ \frac{Z_\mu}{n} & (Z_{T1} + \frac{Z_\mu}{n^2}) \end{vmatrix}. \quad (8)$$

В практических расчетах можно с достаточной точностью принять  $Z_\mu = \infty$ ; в этом случае выражение (8) примет вид:

$$Y_{Z_\mu=\infty} = \frac{1}{Z_{TC}} \begin{vmatrix} n^2 & n \\ n & 1 \end{vmatrix}, \quad (8a)$$

где  $Z_{TC}$  — суммарное сопротивление рассеяния трансформатора, приведенное к стороне II (рис. 2):

$$Z_{TC} = n^2 Z_{T1} + Z_{T2}. \quad (9)$$

Результирующая проводимость двух параллельно соединенных трансформаторных четырехполюсников получается в результате сложения проводимостей каждого из четырехполюсников  $Y'$  и  $Y''$  (рис. 4). При  $Z_\mu = \infty$

$$Y = \begin{vmatrix} \left( \frac{(n')^2}{Z_{TC}} + \frac{(n'')^2}{Z_{TC}} \right) & \left( \frac{n'}{Z_{TC}} + \frac{n''}{Z_{TC}} \right) \\ \left( \frac{n'}{Z_{TC}} + \frac{n''}{Z_{TC}} \right) & \left( \frac{1}{Z_{TC}} + \frac{1}{Z_{TC}} \right) \end{vmatrix}. \quad (10)$$

При каскадном соединении четырехполюсников используются следующие уравнения, которые могут быть получены в результате преобразования уравнений (1) и (2):

$$\dot{U}_1 = -A_{11} \dot{U}_2 + A_{12} I_2, \quad (11)$$

$$I_1 = -A_{21} \dot{U}_2 + A_{22} I_2. \quad (12)$$

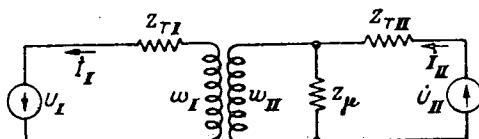


Рис. 2. Схема трансформатора с сопротивлением намагничивания  $Z_\mu$ , приведенным к стороне II.

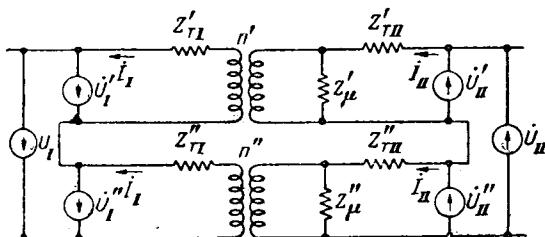


Рис. 3. Последовательное соединение двух трансформаторов.

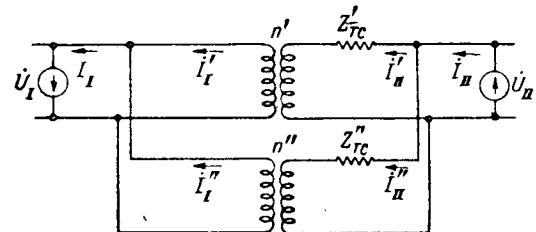


Рис. 4. Параллельное соединение двух трансформаторов ( $Z_\mu = \infty$ ).

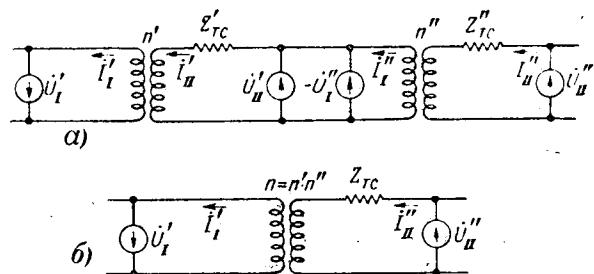


Рис. 5. Каскадное соединение двух трансформаторов ( $Z_\mu = \infty$ ).

а — исходная схема; б — эквивалентная схема.

Коэффициенты уравнений (11) и (12) образуют матрицу величины  $A$ :

$$A = \begin{vmatrix} -\left(\frac{nZ_{T1}}{Z_\mu} + \frac{1}{n}\right) & \left[nZ_{T1}\left(\frac{Z_{T2}}{Z_\mu} + 1\right) + \frac{Z_{T2}}{n}\right] \\ -\frac{n}{Z_\mu} & n\left(\frac{Z_{T2}}{Z_\mu} + 1\right) \end{vmatrix}. \quad (13)$$

При  $Z_\mu = \infty$

$$A_{Z_\mu=\infty} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{n} & \frac{Z_{TC}}{n} \\ 0 & n \end{vmatrix}, \quad (13a)$$

где  $Z_{TC}$  — суммарное сопротивление рассеяния трансформатора, определяемое на основании выражения (9).

При каскадном соединении четырехполюсников величины  $A$  каждого из них перемножаются. При каскадном соединении двух трансформаторов (рис. 5, а) и  $Z_\mu = \infty$  результирующая величина

$$A = A' A'' = \begin{vmatrix} -\frac{1}{n' n''} & \frac{(n'')^2 Z_{TC} + Z_{TC}''}{n' n''} \\ 0 & n' n'' \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Сравнивая выражения (14) и (13а), можно убедиться, что при  $Z_\mu = \infty$  результирующий четырехполюсник представляет собой трансформатор (рис. 5, б), для которого

$$\left. \begin{aligned} n &= n' n'', \\ Z_{TC} &= (n'')^2 Z_{TC}' + Z_{TC}''. \end{aligned} \right\} \quad (14a)$$

При параллельном соединении трансформаторов со стороны одного напряжения ( $I$ ) и последовательном соединении со стороны другого напряжения ( $II$ ) уравнения трансформатора могут быть записаны следующим образом:

$$U_{II} = -D_{II}U_I + D_{I\|}I_{II}, \quad (15)$$

$$I_I = D_{II}U_I + D_{I\|}I_{II}. \quad (16)$$

Коэффициенты уравнений (15) и (16) образуют матрицу величины  $D$ :

$$D = \begin{vmatrix} -nZ_p & \frac{n^2Z_{TI}(Z_{II} + Z_p) + Z_{TII}Z_p}{n^2Z_{TI} + Z_p} \\ \frac{n^2}{n^2Z_{TI} + Z_p} & \frac{nZ}{n^2Z_{TI} + Z_p} \end{vmatrix}. \quad (17)$$

При  $Z_p = \infty$

$$D_{Z_p=\infty} = \begin{vmatrix} -n & Z_{TC} \\ 0 & n \end{vmatrix}, \quad (17a)$$

где  $Z_{TC}$  — суммарное сопротивление рассеяния трансформатора, определяемое на основании выражения (9).

При параллельно-последовательном соединении трансформаторов и  $Z_p = \infty$  (рис. 6, а)

$$D = D' + D'' = \begin{vmatrix} -(n' + n'') & (Z'_{TC} + Z''_{TC}) \\ 0 & (n' + n'') \end{vmatrix}. \quad (18)$$

Сравнивая выражения (18) и (17а), можно установить, что при  $Z_p = \infty$  результирующий четырехполюсник представляет собой трансформатор, у которого  $n = n' + n''$  и  $Z_{TC} = Z'_{TC} + Z''_{TC}$  (рис. 6, б).

Ниже приведены примеры применения полученных соотношений для вычислений токов в различных случаях коротких замыканий в схемах рис. 1. При этом в целях упрощения принимается, что  $Z_p = \infty$  (рис. 2).

**Случай 1.** Короткое замыкание на выводах вторичной обмотки добавочного трансформатора (точка  $K_1$  схемы рис. 1, а). Схема замещения положительной последовательности аварийного режима для

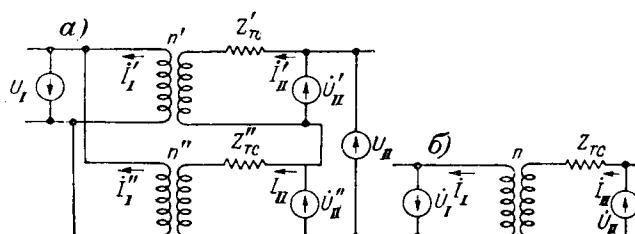


Рис. 6. Параллельно-последовательное соединение двух трансформаторов ( $Z_p = \infty$ ). а — исходная схема; б — эквивалентная схема.

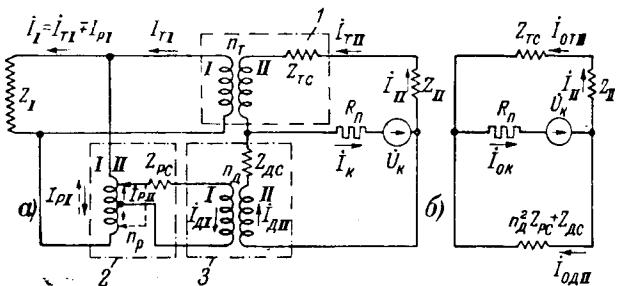


Рис. 7. Схема замещения при коротком замыкании в точке  $K_1$  (рис. 1, а).

а — для положительной (отрицательной) последовательности; б — для нулевой последовательности.  
1 — основной трансформатор; 2 — регулировочный трансформатор;  
3 — добавочный трансформатор.

этого случая показана на рис. 7, а. В месте короткого замыкания включено напряжение  $U_K$  а. д. с. генераторов равны нулю. Схема замещения отрицательной последовательности аналогична схеме замещения положительной последовательности.

Схема рис. 7, а в отличие от схем замещения, обычно применяемых при расчетах токов короткого замыкания, содержит трансформаторы сопротивления схемы не приведены к одному напряжению.

В схеме замещения рис. 7, а трансформаторы, показанные на рис. 1 и имеющие соединение  $Y\Delta$ , заменены трансформаторами с соединением обмоток  $Y/Y$  путем приведения обмотки, соединенной в треугольник, к эквивалентной звезде.

На рис. 7, б показана схема замещения нулевой последовательности для случая, когда все сопротивления приведены к ступени высшего напряжения. Схема рис. 7, б составлена по обычным способам, применяющимся при вычислении токов короткого замыкания.

На рис. 7 и последующих рисунках приняты следующие обозначения:

$Z_{TC}$ ,  $Z_{PC}$  и  $Z_{DC}$  — суммарные сопротивления рассеяния основного, регулировочного и добавочного трансформаторов, приведенные к обмотке II этих трансформаторов;

$n_T$ ,  $n_P$  и  $n_D$  — коэффициенты трансформации основного, регулировочного и добавочного трансформаторов;

$I_T$ ,  $I_P$  и  $I_D$  — токи, протекающие через основной, регулировочный и добавочный трансформаторы; индексы I и II относятся соответственно к первичной и вторичной обмоткам трансформаторов;

$Z_I$  и  $Z_{II}$  — сопротивления систем, присоединенных к рассматриваемой группе трансформаторов;

$I_I$  и  $I_{II}$  — токи, притекающие с обеих сторон к рассматриваемой группе трансформаторов;

$U_K$ ,  $I_K$  и  $R_P$  — напряжение, ток и сопротивление в месте короткого замыкания.

Схемы рис. 7, а (а также 8, 10... 12, 15 и 16), даны для положительного регулирования. При

отрицательном регулировании должны учитываться показанные пунктиром направления токов и нижние знаки отдельных величин.

На схеме, рис. 7, а регулировочный и добавочный трансформаторы включены каскадно. Поэтому в соответствии с выражением (14а) суммарное сопротивление рассеяния регулирующего устройства, приведенное к вторичной стороне добавочного трансформатора:

$$Z_{Py} = n_d^2 Z_{PC} + Z_{dc}, \quad (19)$$

а коэффициент трансформации

$$n_{Py} = n_p n_d. \quad (20)$$

При приведении схемы рис. 7, а к простейшему виду следует учитывать, что основной трансформатор с последовательно включенным сопротивлением системы  $Z_{II}$  включен параллельно эквивалентному трансформатору, параметры которого определяются с помощью выражений (19) и (20).

Применяя при параллельно включенных четырехполюсниках (рис. 8, а) выражение (10), получим величину  $\dot{Y}$  результирующего четырехполюсника

$$Y = Y_T + Y_{Py} = \begin{vmatrix} \left( \frac{n_T^2}{Z_{TC} + Z_{II}} + \frac{n_{Py}^2}{Z_{Py}} \right) & \left( \frac{n_T}{Z_{TC} + Z_{II}} \mp \frac{n_{Py}}{Z_{Py}} \right) \\ \left( \frac{n_T}{Z_{TC} + Z_{II}} \mp \frac{n_{Py}}{Z_{Py}} \right) & \left( \frac{1}{Z_{TC} + Z_{II}} + \frac{1}{Z_{Py}} \right) \end{vmatrix}. \quad (21)$$

Путем соответствующего преобразования выражения (21) получим величину  $Z$  результирующего четырехполюсника:

$$Z = \begin{vmatrix} \frac{Z_{TC} + Z_{II} + Z_{Py}}{(n_T \pm n_{Py})^2} & \frac{n_T Z_{Py} \mp n_{Py} (Z_{TC} + Z_{II})}{(n_T \pm n_{Py})^2} \\ -\frac{n_T Z_{Py} \mp n_{Py} (Z_{TC} + Z_{II})}{(n_T \pm n_{Py})^2} & \frac{n_T^2 Z_{Py} + n_{Py}^2 (Z_{TC} + Z_{II})}{(n_T \pm n_{Py})^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{II} & -Z_{IK} \\ -Z_{IK} & Z_{KK} \end{vmatrix}. \quad (22)$$

В выражениях (21) и (22) так же, как и в выражениях, которые будут приведены ниже, верхний знак соответствует положительному, а нижний отрицательному регулированию.

В соответствии с выражением (22) результирующий четырехполюсник (рис. 8, б) характеризуется уравнениями

$$\dot{U}_I = Z_{II} \dot{I}_I - Z_{IK} \dot{I}_K, \quad (23)$$

$$\dot{U}_K = -Z_{IK} \dot{I}_I + (Z_{KK} + R_{II}) \dot{I}_K. \quad (24)$$

В результате преобразования выражений (23) и (24) можно получить:

$$\dot{U}_I = (Z_{II} + Z_{IK}) \dot{I}_I - Z_{IK} (\dot{I}_I + \dot{I}_K), \quad (25)$$

$$\dot{U}_K = (Z_{KK} + Z_{IK} + R_{II}) \dot{I}_K - Z_{IK} (\dot{I}_I + \dot{I}_K) \quad (26)$$

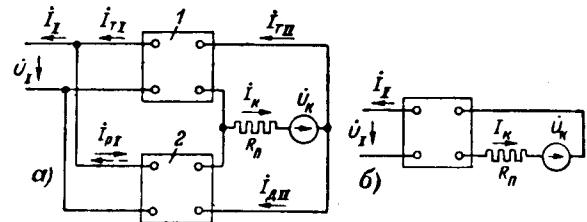


Рис. 8. Параллельное соединение основного трансформатора и регулирующего устройства.

а — исходная схема; б — результирующий четырехполюсник.

1 — основной трансформатор; 2 — регулирующее устройство.

или

$$\dot{U}_I = (Z_{II} - Z_{IK}) \dot{I}_I - Z_{IK} (\dot{I}_K - \dot{I}_I), \quad (25a)$$

$$\dot{U}_K = (Z_{KK} - Z_{IK} + R_{II}) \dot{I}_K + Z_{IK} (\dot{I}_K - \dot{I}_I). \quad (26a)$$

Уравнения (25) и (26), (25a) и (26a) удовлетворяют соответственно эквивалентные Т-образные схемы рис. 9, которые замещают схемы положительной (отрицательной) последователь-

ности рис. 7, а. Применение схем рис. 9 при вычислениях показано ниже на конкретном примере.

**Случай 2.** Короткое замыкание на выводах вторичной обмотки добавочного трансформатора (точка  $K_1$  схемы рис. 1, б). Схема замещения положительной (отрицательной) последовательности для рассматриваемого случая показана на рис. 10. Она отличается от схемы рис. 7, а тем, что

$$Z_{TC} = 0; n_T = 1. \quad (27)$$

Таким образом, выражения (21)…(26a) и эквивалентные схемы рис. 9 верны и для рассматриваемого случая, если принять в них значения  $Z_{TC}$  и  $n_T$ , указанные в (27).

**Случай 3.** Короткое замыкание на выводах вторичной обмотки регули-

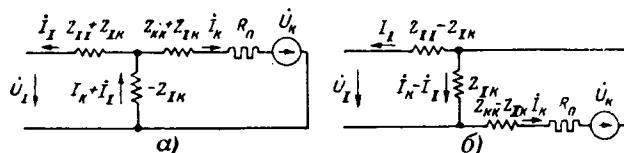


Рис. 9. Эквивалентные схемы для положительной (отрицательной) последовательности, замещающие схему рис. 7,а.

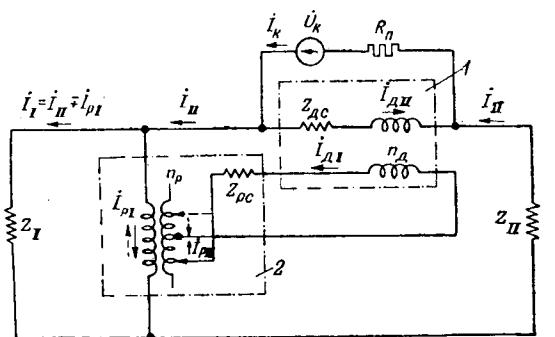


Рис. 10. Схема замещения положительной (отрицательной) последовательности при коротком замыкании в точке  $K_1$  (рис. 1,б).

1 — добавочный трансформатор; 2 — регулировочный трансформатор.

ровочного трансформатора (точка  $K_2$  схемы рис. 1,а). Схема замещения положительной (отрицательной) последовательности (с трансформаторными связями) показана на рис. 11. Основной трансформатор с последовательно включенным сопротивлением  $Z_{\Pi}$  и добавочный трансформатор соединены каскадно. Согласно выражению (14а) приведенное к первичной стороне добавочного трансформатора суммарное сопротивление эквивалентного трансформатора, заменяющего собой основной и добавочный трансформаторы,

$$Z_3 = \frac{Z_{TC} + Z_{II} + Z_{DC}}{n_L^2}, \quad (28)$$

а коэффициент трансформации

$$n_\partial = \frac{n_T}{n_\pi}. \quad (29)$$

Применив выражение (10) к схеме рис. 11, в которой трансформатор с параметрами  $Z_\vartheta$  и  $n_\vartheta$  и регулировочный трансформатор включены параллельно, получим по аналогии с выражением (22):

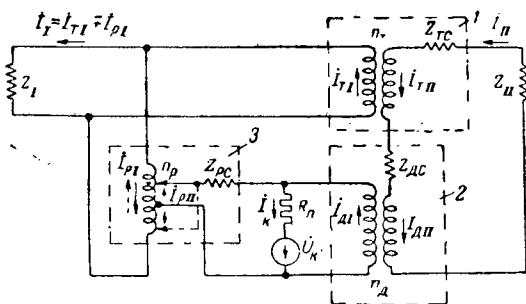


Рис. 11. Схема замещения положительной (отрицательной) последовательности при коротком замыкании в точке  $K_2$  (рис. 1,а).

1—основной трансформатор; 2—добавочный трансформатор; 3—регулировочный трансформатор.

Для рассматриваемого случая сохраняют силу выражения (25) . . . (26а) и эквивалентные схемы рис. 9. В случае короткого замыкания в точке  $K_1$  (рис. 1,б) следует учитывать выражение (27).

Случай 4. Короткое замыкание на выводах основного трансформатора (точка  $K_3$  или  $K_4$  схем рис. 1). При внешнем коротком замыкании в точке  $K_3$  или в точке  $K_4$  (схема рис. 1, а) основной трансформатор и регулирующее устройство (регулировочный и добавочный трансформаторы) включены параллельно со стороны станции I и последовательно со стороны системы II (рис. 12).

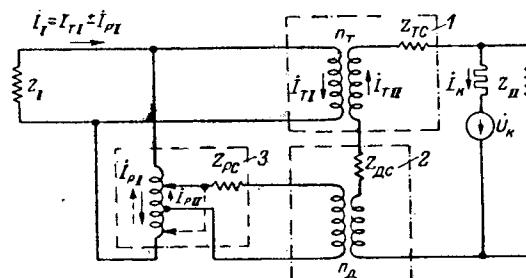


Рис. 12. Схема замещения положительной (отрицательной) последовательности при коротком замыкании в точке  $K_a$  (рис. 1, а).

1 — основной трансформатор; 2 — добавочный трансформатор; 3 — регулировочный трансформатор.

Согласно выражению (18) при таком соединении основной трансформатор и регулирующее устройство могут заменяться в схеме положительной (отрицательной) последовательности эквивалентным трансформатором. Сопротивление этого трансформатора, приведенное к вторичной стороне,

$$Z = \begin{vmatrix} \frac{Z_\theta + Z_{PC}}{(n_\theta \pm n_p)^2} & -\frac{n_\theta Z_{PC} \mp n_p Z_\theta}{(n_\theta \pm n_p)^3} \\ -\frac{n_\theta Z_{PC} \mp n_p Z_\theta}{(n_\theta \pm n_p)} & \frac{n_\theta^2 Z_{PC} + n_p^2 Z_\theta}{(n_\theta \pm n_p)^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{11} & -Z_{1K} \\ -Z_{IK} & Z_{KK} \end{vmatrix}. \quad (30)$$

$$Z_{T\vartheta} = Z_{TC} + Z_{DC} + n_D^2 Z_{PC}, \quad (31)$$

коэффициент трансформации

$$n_{T3} = n_T \pm n_P n_D. \quad (32)$$

При внешнем повреждении в точке  $K_3$  или  $K_4$  (схема рис. 1, б) параметры эквивалентного

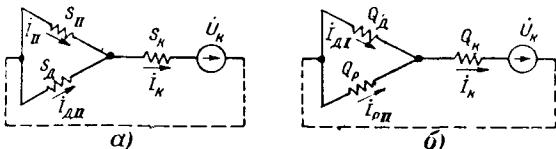


Рис. 13. Эквивалентные схемы для случаев повреждений.

а — в точке  $K_1$ ; б — в точке  $K_2$  (рис. 1).

трансформатора в схеме положительной (отрицательной) последовательности определяются на основании выражений (31) и (32), но при  $Z_{TC} = 0$  и  $n_T = 1$ . В остальном методы вычисления токов при внешних повреждениях ничем не отличаются от известных методов расчета сетей, содержащих трансформаторы.

**Вычисление токов при внутренних повреждениях с помощью эквивалентных схем.** Этот метод основан на применении эквивалентных схем; с его помощью определяются токи на участках, примыкающих к месту короткого замыкания.

Для случая короткого замыкания в точке  $K_1$  (рис. 1, а) можно на основании схемы положительной (отрицательной) последовательности (рис. 7, а) написать следующие уравнения:

$$\dot{U}_K = R_H \dot{I}_K + (Z_H + Z_{TC}) \dot{I}_H + n_T Z_1 (\dot{I}_{T1} \mp \dot{I}_{P1}), \quad (33)$$

$$\dot{U}_K = R_H \dot{I}_K + (Z_{DC} + n_D^2 Z_{PC}) \dot{I}_{DH} + n_P n_D Z_1 (\dot{I}_{P1} \mp \dot{I}_{T1}). \quad (34)$$

После соответствующих преобразований получим:

$$\dot{U}_K = S_H \dot{I}_H + S_K \dot{I}_K, \quad (33a)$$

$$\dot{U}_K = S_D \dot{I}_{DH} + S_K \dot{I}_K, \quad (34a)$$

где

$$\left. \begin{aligned} S_H &= Z_H + Z_{TC} + n_T^2 Z_1 \mp n_P n_D n_T Z_1, \\ S_D &= Z_{DC} + n_D^2 (Z_{PC} + n_P^2 Z_1) \mp n_P n_D n_T Z_1, \\ S_K &= R_H \mp n_P n_D n_T Z_1. \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Для случая короткого замыкания в точке  $K_2$  (рис. 1, а) на основании схемы рис. 11 можно составить следующие выражения:

$$\dot{U}_K = R_H \dot{I}_K + \frac{Z_H + Z_{TC} + Z_{DC}}{n_D} \dot{I}_H + \frac{n_T}{n_D} Z_1 (\dot{I}_{T1} \mp \dot{I}_{P1}), \quad (36)$$

$$\dot{U}_K = R_H \dot{I}_K + Z_{PC} \dot{I}_{PH} + n_P Z_1 (\dot{I}_{P1} \mp \dot{I}_{T1}). \quad (37)$$

После соответствующих преобразований получим:

$$\dot{U}_K = Q_D \dot{I}_{DH} + Q_K \dot{I}_K, \quad (36a)$$

$$\dot{U}_K = Q_P \dot{I}_{PH} + Q_K \dot{I}_K, \quad (37a)$$

где

$$\left. \begin{aligned} Q_D &= \frac{Z_H + Z_{TC} + Z_{DC} + n_T^2 Z_1}{n_D^2} \mp \frac{n_P n_T}{n_D} Z_1, \\ Q_P &= Z_{PC} + n_P^2 Z_1 \mp \frac{n_P n_T}{n_D} Z_1, \\ Q_K &= R_H \mp \frac{n_P n_T}{n_D} Z_1. \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Как и в ранее приведенных выражениях, верхний знак соответствует положительному, а нижний отрицательному регулированию.

Выражения (33а), (34а), (36а) и (37а) справедливы и для случаев повреждений в точках  $K_1$  и  $K_2$  схемы рис. 1, б, если принять  $n_T = 1$  и  $Z_{TC} = 0$ . Исходя из этих выражений, составлены эквивалентные схемы рис. 13, которые позволяют весьма просто определить токи короткого замыкания.

Следует заметить, что в схемах рис. 13 вместо результирующего сопротивления  $Z_H$  может быть введена схема замещения системы  $H$ .

**Вычисление токов при внутренних повреждениях с помощью П-образных эквивалентных схем.** Этот способ заключается в том, что трансформаторные цепи, входящие в схемы рис. 1, заменяются эквивалентными схемами. При  $Z_H = \infty$  удобно пользоваться П-образными эквивалентными схемами.

Выражения (6) и (7) могут быть преобразованы следующим образом:

$$\dot{I}_I = (Y_{II} - Y_{III}) \dot{U}_I + Y_{I\|II} (\dot{U}_I + \dot{U}_{II}), \quad (39)$$

$$\dot{I}_{II} = Y_{I\|II} (\dot{U}_I + \dot{U}_{II}) + (Y_{III} - Y_{II}) \dot{U}_{III} \quad (40)$$

или

$$\dot{I}_I = (Y_{II} + Y_{III}) \dot{U}_I - Y_{I\|III} (\dot{U}_I - \dot{U}_{III}), \quad (39a)$$

$$\dot{I}_{III} = -Y_{I\|III} (\dot{U}_I - \dot{U}_{III}) + (Y_{II\|III} + Y_{III}) \dot{U}_{III}. \quad (40a)$$

Проводимости  $Y$ , входящие в выражения (39) ... (40a), при  $Z_H = \infty$  определяются с помощью выражений (8а). Выражениям (39) и (40) соответствуют эквивалентная схема рис. 14, а, а выражениям (39а) и (40а) — схема рис. 14, б. На основании этих схем составлены схемы замещения без трансформаторных связей (рис. 15) для случаев короткого замыкания в точках  $K_1$  и  $K_2$  рис. 1, а, соответствующие схемам замещения рис. 7, а и рис. 11 с трансформаторными связями.

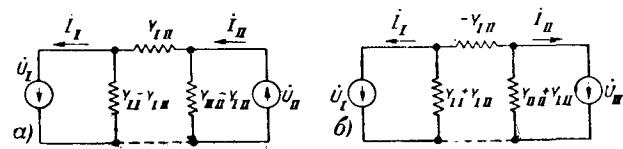
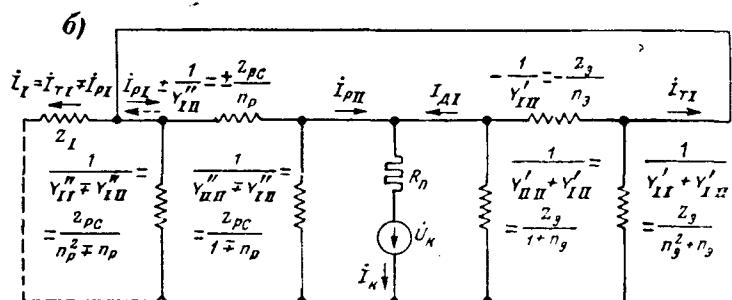
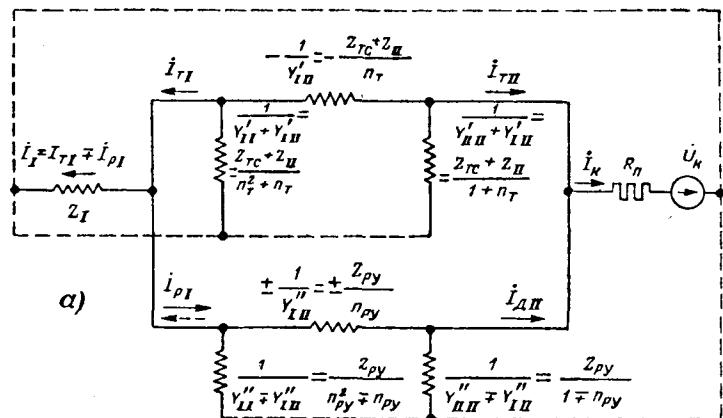


Рис. 14. Эквивалентные П-образные схемы.



В схеме рис. 15, а основной трансформатор вместе с последовательно включенным сопротивлением  $Z_{II}$  (рис. 7, а) заменен эквивалентной схемой с параметрами  $Y'$ , а регулировочное устройство—схемой с параметрами  $Y''$ . В схеме рис. 15, б основной трансформатор, сопротивление  $Z_{II}$  и добавочный трансформатор (рис. 11) заменены эквивалентной схемой с параметрами  $Y'$ , а регулировочный трансформатор—схемой с параметрами  $Y''$ .

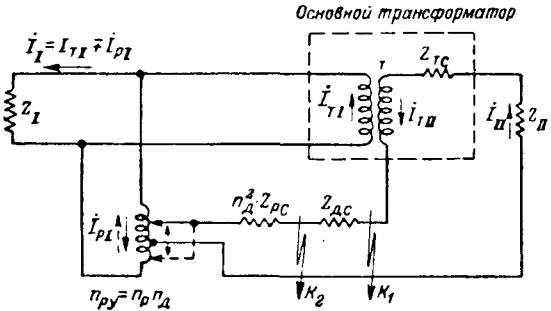


Рис. 16. Схема замещения положительной (отрицательной) последовательности для случая повреждений в точках  $K_1$  и  $K_2$  (рис. 1, а).

Рис. 15. Схема замещения положительной (отрицательной) последовательности без трансформаторных связей: а—для случая повреждения в точке  $K_1$ ; б—для случая повреждения в точке  $K_2$  (рис. 1, а). Величины  $Z_{py}$  и  $n_{py}$  вычисляются на основании выражений (19) и (20), а величины  $Z_g$  и  $n_g$ —на основании выражений (28) и (29).

Следует отметить, что для вычисления коротких замыканий в точках  $K_1$  и  $K_2$  (рис. 1, а) взамен схем рис. 7, а и рис. 11 может быть использована схема замещения рис. 16, на которой регулировочный и добавочный трансформаторы заменены одним трансформатором с коэффициентом трансформации  $n_{py} = n_p n_d$ . Применение схемы рис. 16 позволяет по одним и тем же выражениям вычислять токи короткого замыкания при повреждениях в точке  $K_1$  и в точке  $K_2$  (рис. 1, а).

#### Особенности вычисления токов короткого замыкания при приключении добавочного трансформатора к одной из обмоток трехобмоточного трансформатора.

Исходная схема дана на рис. 17, а.

Для составления расчетных выражений заменим трехобмоточный трансформатор двумя двухобмоточными [Л. 6], как это показано на схеме рис. 17, б.  $Z_{T1}$ ,  $Z_{TII}$  и  $Z_{TIII}$ —индивидуальные сопротивления отдельных обмоток трехобмоточного трансформатора, отнесенные к ступени напряжения  $I$ , а  $Z_{py}$ —сопротивление регулирующего устройства, отнесенное к ступени регулируемого напряжения. Идеальный трансформатор с коэффициентом трансформации  $n_{III}$  (рис. 17, б) перенесем за точку разветвления  $a$  (рис. 17, в). Рассмотрим способы расчета токов для двух случаев короткого замыкания в схеме рис. 17, в.

**Случай 1.** Короткое замыкание на выводах основного трансформатора (на шинах  $I$ ,  $II$  и  $III$  рис. 17, в). Схема заме-

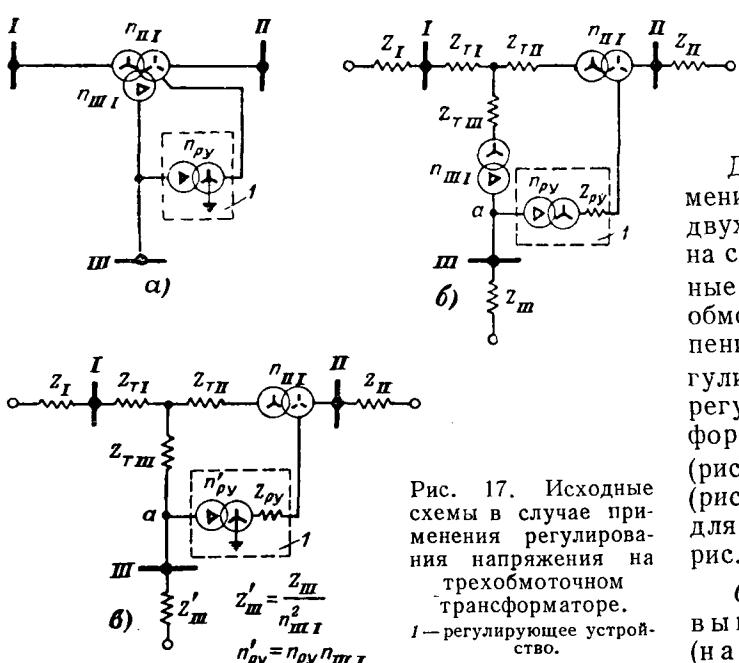


Рис. 17. Исходные схемы в случае применения регулирования напряжения на трехобмоточном трансформаторе. 1—регулирующее устройство.  
 $n'_{py} = n_{py} n_{III}$   
 $z'_{III} = \frac{z_{III}}{n_{III}^2}$

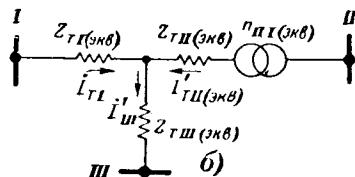
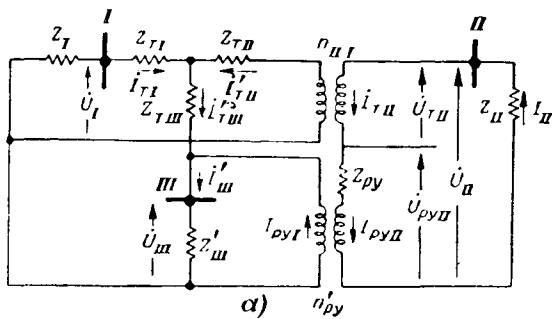


Рис. 18. Схемы замещения при внешнем коротком замыкании в схеме рис. 17, а.

щения для этого случая представлена на рис. 18, а. На основании этой схемы могут быть составлены следующие выражения для положительной и отрицательной последовательностей:

$$n_{II} \dot{U}_I = r_{II} Z_{TI} \dot{I}_{TI} - n_{II}^2 Z_{TII} \dot{I}_{TII} + \dot{U}_{TII}, \quad (41)$$

$$n'_{PY} \dot{U}_I = n'_{PY} (Z_{TI} \dot{I}_{TI} + Z_{TII} \dot{I}'_{TII}) - Z_{PY} \dot{I}_{PYII} + \dot{U}_{PYII}, \quad (42)$$

$$n_{II} \dot{U}_{III} = -n_{II} Z_{TII} \dot{I}'_{TII} - n_{III}^2 Z_{TII} \dot{I}_{TII} + \dot{U}_{TII}, \quad (43)$$

$$n'_{PY} \dot{U}_{III} = -Z_{PY} \dot{I}_{PYII} + \dot{U}_{PYII}, \quad (44)$$

$$\dot{U}_I = Z_{TI} \dot{I}_{TI} + Z_{TII} \dot{I}'_{TII} + \dot{U}_{III}. \quad (45)$$

Сложим левые и правые части выражений (41) и (42), (43) и (44). Учитывая соотношения между токами в схеме рис. 18, а, преобразуем полученные в результате сложения выражения, а также выражение (45), после чего получим:

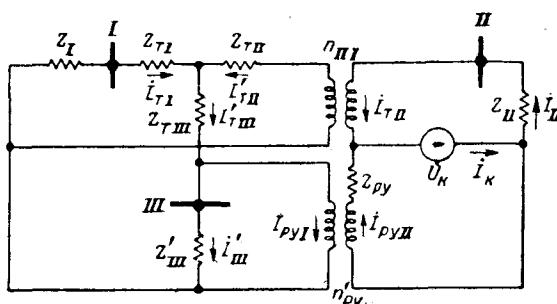


Рис. 19. Схема замещения для случая короткого замыкания на выводах регулирующего устройства (рис. 17, а).

$$\begin{aligned} \dot{U}_I = & \left( Z_{TI} + \frac{n'_{PY} Z_{TIII}}{n_{II} + n'_{PY}} \right) \dot{I}_{TI} - \\ & - \frac{Z_{PY} + n_{II}^2 Z_{TII} - n_{II} n'_{PY} Z_{TIII}}{(n_{II} + n'_{PY})^2} \dot{I}'_{TII(экв)} + \\ & + \frac{\dot{U}_{II}}{n_{II} + n'_{PY}} = Z_{TI(экв)} \dot{I}_{TI} - \\ & - Z_{TII(экв)} \dot{I}'_{TII(экв)} + \frac{\dot{U}_{II}}{n_{II} + n'_{PY}}, \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{III} = & -\frac{n_{II} Z_{TIII}}{n_{II} + n'_{PY}} \dot{I}'_{III} - \\ & - \frac{Z_{PY} + n_{II}^2 Z_{TII} - n_{II} n'_{PY} Z_{TIII}}{(n_{II} + n'_{PY})^2} \dot{I}'_{TII(экв)} + \\ & + \frac{\dot{U}_{II}}{n_{II} + n'_{PY}} = -Z_{TIII(экв)} \dot{I}'_{III} - \\ & - Z_{TII(экв)} \dot{I}'_{TII(экв)} + \frac{\dot{U}_{II}}{n_{II} + n'_{PY}}, \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} U_I = & \left( Z_{TI} + \frac{n'_{PY} Z_{TIII}}{n_{II} + n'_{PY}} \right) \dot{I}_{TI} + \\ & + \frac{n_{II} Z_{TIII}}{n_{II} + n'_{PY}} \dot{I}'_{III} + \dot{U}_{III} = \\ & = Z_{TI(экв)} \dot{I}_{TI} + Z_{TIII(экв)} \dot{I}'_{III} + \dot{U}_{III}, \end{aligned} \quad (48)$$

где

$$\dot{I}'_{TII(экв)} = (n_{II} + n'_{PY}) \dot{I}_{TII}. \quad (48a)$$

Выражения (46)…(48) показывают, что группа из трехобмоточного основного трансформатора и регулирующего устройства (рис. 17, а) может быть представлена эквивалентной схемой рис. 18, б с сопротивлениями  $Z_{TI(экв)}$ ,  $Z_{TIII(экв)}$  и  $Z_{TII(экв)}$  и коэффициентом трансформации

$$n_{II(экв)} = n_{II} + n'_{PY}. \quad (49)$$

*Случай 2.* Короткое замыкание на выводах вторичной обмотки регулирующего устройства (рис. 19). На основании схемы замещения (рис. 19) можно составить следующие выражения:

$$\dot{U}_K = n_{II}^2 Z_{TII} \dot{I}_{TII} - n_{II} (Z_{TI} + Z_I) \dot{I}_{TI}, \quad (50)$$

$$\dot{U}_K = Z_{PY} \dot{I}_{PYII} - n'_{PY} Z'_{III} \dot{I}'_{III}. \quad (51)$$

Произведем соответствующие преобразования выражений (50) и (51), учитывая соотношения между токами в схеме рис. 19. Обозначим  $Z_{TI} + Z_I$  через  $Z'_{TI}$ . После этого получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_K = & \left( n_{II}^2 Z_{TII} + \frac{n_{II}^2 Z'_{TI} (Z_{TIII} + Z'_{III})}{Z_{TI} + Z_{TIII} + Z'_{III}} \right. + \\ & \left. + \frac{n_{II} n'_{PY} Z'_{TI} Z'_{III}}{Z'_{TI} + Z_{TIII} + Z'_{III}} \right) \dot{I}_{TII} - \end{aligned}$$

$$-\frac{n_{II} n'_{PY} Z'_{TI} Z'_{III}}{Z'_{TI} + Z_{TIII} + Z'_{III}} \dot{I}_K = S_T \dot{I}_{TII} - S_K \dot{I}_K, \quad (52)$$

$$\dot{U}_K = \left[ Z_{PY} + \frac{(n')^2 Z_{III} (Z'_{T1} + Z_{TIII}) + n_{II} n'_{PY} Z'_{T1} Z'_{III}}{Z'_{T1} + Z_{TIII} + Z'_{III}} \right] I_{PYII} - \frac{n_{II} n'_{PY} Z'_{T1} Z'_{III}}{Z'_{T1} + Z_{TIII} + Z'_{III}} I_K = S_{PY} I_{PYII} - S_K I_K. \quad (53)$$

Выражениям (52) и (53) удовлетворяет эквивалентная схема, аналогичная схемам рис. 13, на основании которой весьма просто определить аварийные токи в рассматриваемом случае короткого замыкания.

Расчетные выражения весьма упрощаются в тех случаях, когда в схеме рис. 17,в сопротивление обмотки, включенной в треугольник,  $Z_{TIII} = 0$ . Это часто имеет место при трехобмоточных трансформаторах. Расчетные выражения упрощаются также в случае использования обмотки III для питания только регулирующего устройства, т. е. когда  $Z'_{III} = \infty$ .

#### Примеры вычисления токов при внутренних повреждениях

**Пример 1.** Требуется рассчитать токи при металлическом замыкании на землю фазы A на выводах добавочного трансформатора (рис. 20, точка  $K_1$ ).

Станция с двумя генераторами мощностью 25 тыс. квт каждый имеет собственную нагрузку и связана с системой

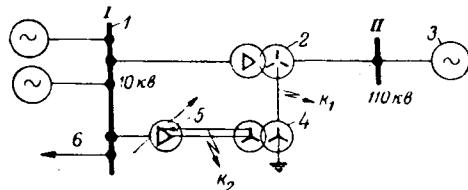


Рис. 20. Схема, принятая для примера расчета.

1—станина:  $x_d'' = x_2 = 0,125$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ ; 2—основной трансформатор:  $x_T = 0,105$ ,  $n_T = \frac{12,1}{10,5} = 11,5$ ; 3—система:  $x_{1C} = x_{0C} = 18 \text{ ом}$ ; 4—добавочный трансформатор: 4,05 тыс. ква,  $x_0 = 0,063$ ,  $n_D = \frac{11}{4,32} = 2,54$ ; 5—регулирующий автотрансформатор: 4,05 тыс. ква,  $x_P = 0,085$ ,  $n_P = \frac{4,32}{11} = 0,394$ ; 6—нагрузка: 20 тыс. ква,  $x_1 = 1,2$ ,  $x_2 = 0,35$ .

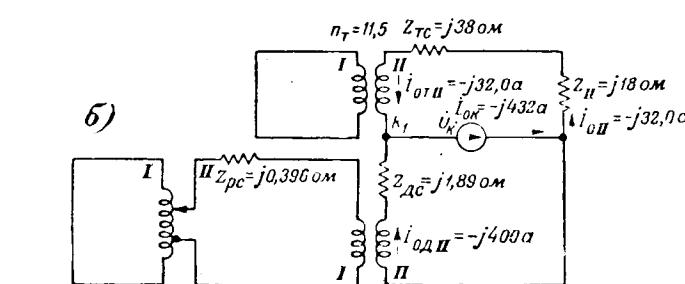
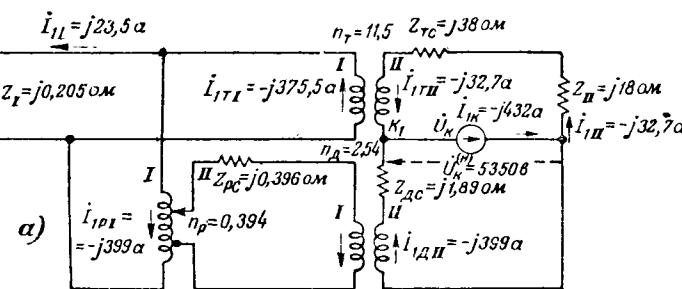


Рис. 21. Схемы замещения положительной (отрицательной) и нулевой (б) последовательностей для случая замыкания на землю в точке  $K_1$  (рис. 20). Регулирование положительное.

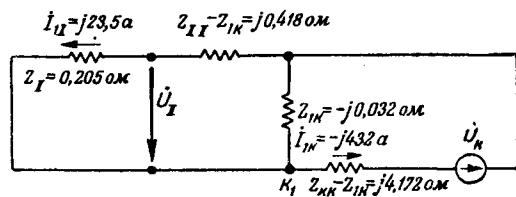


Рис. 22. Эквивалентная схема, замещающая схему рис. 21,а.

мой 110 кв через трансформатор мощностью 40,5 тыс. квт с отдельным устройством для регулирования напряжения под нагрузкой. На регулировочном трансформаторе установлено ответвление, соответствующее максимальному положительному регулированию. Нагрузочные токи при этом предшествующем нагрузочном режиме известны. Сопротивления отдельных элементов даны (рис. 20) в относительных единицах, приведенных к собственной мощности отдельных элементов. Система II 110 кв задана приведенным сопротивлением в омах.

Расчет производится с помощью принципа наложения в именованных единицах. Схемы замещения отдельных последовательностей, составленные на основании схемы рис. 7 с сохранением трансформаторных связей, даны на рис. 21. Схема положительной последовательности дана для аварийного режима. Сопротивления трансформаторов, показанные на рис. 21, приведены к вторичным сторонам этих трансформаторов. В целях упрощения в качестве сопротивления станции взято среднеарифметическое из сопротивлений положительной и отрицательной последовательностей. Напряжение в точке  $K_1$  при нормальном режиме определено путем расчета и равно  $U_K^{(H)} = 5350$  в.

Схемы замещения положительной (отрицательной) последовательности приводим к виду эквивалентной схемы рис. 9,б. Параметры этой схемы вычисляем на основании выражений (19), (20) и (22):

$$Z_{PY} = n_D^2 Z_{PC} + Z_{DC} = 2,54^2 \cdot j0,396 + j1,89 = j4,45 \text{ ом}$$

$$n_{PY} = n_P n_D = 1,0,$$

$$Z_{II} = \frac{Z_{TC} + Z_{II} + Z_{PY}}{(n_T + n_{PY})^2} = \frac{j38 + j18 + j4,45}{(11,5 + 1)^2} = j0,386 \text{ ом},$$

$$Z_{IK} = \frac{n_T Z_{PY} - n_{PY} (Z_{TC} + Z_{II})}{(n_T + n_{PY})^2} =$$

$$= \frac{11,5 \cdot j4,45 - j \cdot 1 (38 + 18)}{(11,5 + 1)^2} = -j0,032 \text{ ом},$$

$$Z_{KK} = \frac{n_T^2 Z_{PY} + n_{PY}^2 (Z_{TC} + Z_{II})}{(n_T + n_{PY})^2} =$$

$$= \frac{11,5^2 j4,44 + j1 (38 + 18)}{(11,5 + 1)^2} = j4,14 \text{ ом}.$$

Эквивалентная схема для рассматриваемого случая представлена на рис. 22.

Результирующее сопротивление положительной (отрицательной) последовательности схемы рис. 22, приведенное к месту замыкания на землю,

$$Z_{12} = Z_{21} = j4,138 \text{ ом}.$$

Результирующее сопротивление нулевой последовательности схемы рис. 21,б, приведенное к месту замыкания на землю,

$$Z_{0\Sigma} = \frac{(j38+j18)(2,54^2 \cdot j0,396+j1,89)}{j38+j18+2,54^2 \cdot j0,396+j1,89} = j4,12 \text{ ом.}$$

Токи отдельных последовательностей в месте замыкания на землю

$$I_{1K} = I_{2K} = I_{0K} = \frac{U_K^{(H)}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} = \\ = \frac{5350}{j(2,4,138+4,12)} = -j432 \text{ а.}$$

Ток  $I_{11}$  (схема рис. 22) находится путем распределения по отдельным ветвям тока  $I_{1K}$ .

Чтобы определить распределение токов положительной и отрицательной последовательностей в схеме замещения рис. 21,а, вычислим ток, протекающий через элементы системы II:

$$I_{11} = \frac{U_K^{(H)} - Z_{2K} I_{2K} - Z_{0K} I_{0K} - n_T Z_1 I_{11}}{Z_{TC} + Z_{III}} = \\ = \frac{5350 - j(4,138+4,12)(-j432) - 11,5 j0,205 j23,5}{j(38+16)} = \\ = -j32,7 \text{ а.}$$

После этого нетрудно определить токи положительной (отрицательной) последовательности на других участках схемы рис. 21,а.

Распределение токов нулевой последовательности дано на рис. 21,б.

Полные токи положительной последовательности на отдельных участках схемы рис. 21,а, как указывалось выше, определяются сложением токов положительной последовательности в аварийном режиме с токами предшествующего нормального режима. Полные фазные токи на участках, примыкающих к месту повреждения (токи  $I_{1II}$  и  $I_{1DII}$  в сети 110 кВ), находятся суммированием токов отдельных последовательностей. Полные фазные токи в цепях других напряжений находятся путем пересчета вычисленных фазных токов  $I_{1II}$  и  $I_{1DII}$ .

Определим токи положительной последовательности при замыкании на землю в точке  $K_1$  схемы рис. 20 также с помощью эквивалентной схемы (рис. 13,а). Для этого воспользуемся выражениями (35):

$$S_{II} = j18 + j38 + 11,5^2 \cdot j0,205 + 1 \cdot 11,5 \cdot j0,205 = j85,4 \text{ ом,}$$

$$S_{D} = j1,89 + 2,54^2(j0,396 + 0,394^2 \cdot j0,205) + 1 \cdot 11,5 \cdot j0,205 = \\ = j7,0 \text{ ом,}$$

$$S_K = -1 \cdot 11,5 \cdot j0,205 = -j2,36 \text{ ом.}$$

Сопротивления положительной и отрицательной последовательностей

$$Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma} = \frac{j85,4 \cdot j7,00}{j92,4} = j2,36 = j4,135 \text{ ом,}$$

т.е. практически совпадают с вычисленным ранее.

Токи на отдельных участках схемы рис. 13,а

$$I_{1II} = \frac{-j432 j7,00}{j92,4} = -j32,7 \text{ а,}$$

$$I_{1DII} = \frac{-j432 j85,4}{j92,4} = -j399 \text{ а.}$$

Полные фазные токи определяются аналогично предыдущему. По известным токам нетрудно найти напряжения в отдельных точках схемы рис. 20.

**Пример 2.** Требуется рассчитать токи при замыкании между выводами фазы А, соединяющими регулировочный и добавочный трансформаторы (рис. 20, точка  $K_2$ ). Принимается, что в предшествующем короткому замыканию нормальном режиме на регулировочном трансформаторе было установлено ответвление, соответствующее макси-

мальному отрицательному регулированию. Сопротивления, приведенные на рис. 20, сохраняются и для данного случая.

Расчет производится с помощью принципа наложения. Схемы замещения отдельных последовательностей с трансформаторными связями даны на рис. 23. Схема замещения положительной (отрицательной) последовательности составлена на основании рис. 11. Напряжение при нормальном режиме в точке  $K_2$  определено путем расчета и равно  $U_K^{(H)} = -2510 \text{ в.}$

Схему замещения положительной (отрицательной) последовательности приведем к виду эквивалентной схемы рис. 9,а. Параметры этой схемы вычислим с помощью выражений (28), (29) и (30):

$$Z_{\varTheta} = \frac{Z_{TC} + Z_{III} + Z_{DC}}{n_{\varDelta}^2} = \frac{j(38+18+1,89)}{2,54^2} = j8,95 \text{ ом,}$$

$$n_{\varTheta} = \frac{n_T}{n_{\varDelta}} = \frac{11,5}{2,54} = 4,53,$$

$$Z_{11} = \frac{Z_{\varTheta} + Z_{PC}}{(n_{\varTheta} - n_P)^2} = \frac{j8,95 + j0,396}{(4,53 - 0,394)^2} = j0,543 \text{ ом,}$$

$$Z_{1K} = \frac{n_{\varTheta} Z_{PC} + n_P Z_{\varTheta}}{(n_{\varTheta} - n_P)^2} =$$

$$= \frac{4,53 j0,396 + 0,394 j8,95}{(4,53 - 0,394)^2} = j0,309 \text{ ом,}$$

$$Z_{KK} = \frac{n_{\varTheta}^2 Z_{PC} + n_P^2 Z_{\varTheta}}{(n_{\varTheta} - n_P)^2} =$$

$$= \frac{4,53^2 j0,396 + 0,394^2 j8,95}{(4,53 - 0,394)^2} = j0,553 \text{ ом.}$$

Составленная на основании этих параметров эквивалентная схема для рассматриваемого случая дана на рис. 24.

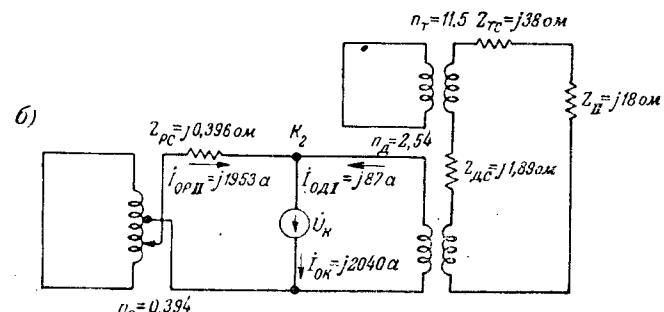
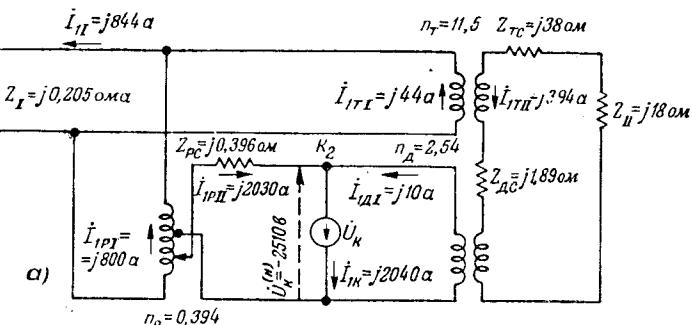


Рис. 23. Схемы замещения положительной (отрицательной) (а) и нулевой (б) последовательностей при замыкании на землю в точке  $K_2$  (рис. 20). Отрицательное регулирование.

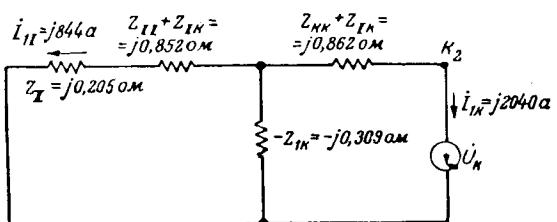


Рис. 24. Эквивалентная схема, замещающая схему рис. 23,а.

Результирующие сопротивления положительной и отрицательной последовательностей, приведенные к месту повреждения (схема рис. 23,а),

$$Z_{12} = Z_{22} = j0.425 \text{ ом.}$$

Результирующее сопротивление нулевой последовательности, приведенное к месту повреждения (схема рис. 23,б),

$$Z_{02} = \frac{Z_3 Z_{PC}}{Z_3 + Z_{PC}} = \frac{j8.95 j0.396}{j8.95 + j0.396} = j0.379 \text{ ом.}$$

Токи отдельных последовательностей в месте повреждения

$$\begin{aligned} I_{1K} &= I_{2K} = I_{0K} = \frac{U_K^{(H)}}{Z_{12} + Z_{22} + Z_{02}} = \\ &= \frac{-2510}{j(2.0425 + 0.379)} = j2040 \text{ а.} \end{aligned}$$

Распределив ток  $I_{1K}$  по отдельным ветвям схемы рис. 24, найдем  $I_{11} = j844 \text{ а.}$  Ток положительной последовательности, протекающий через вторичную обмотку регулировочного трансформатора (рис. 23,а),

$$\begin{aligned} I_{1PII} &= \frac{U_K^{(H)} - Z_{22} I_{2K} - Z_{02} I_{0K} - n_P Z_1 I_{11}}{Z_{PC}} = \\ &= \frac{-2510 - j(0.425 + 0.379) j2040 - 0.394 j0.205 j844}{j0.396} = j2030 \text{ а.} \end{aligned}$$

После этого нетрудно найти токи на других участках схемы рис. 23,а. Распределение токов нулевой последовательности дано на рис. 23,б. Полные фазные токи могут быть определены в соответствии с указаниями к примеру 1.

Определим токи положительной последовательности с помощью П-образных эквивалентных схем (рис. 15,б). Схема замещения, на которой трансформаторы представлены эквивалентными П-образными схемами и параметры которой вычислены согласно рис. 15,б, приведена на рис. 25. Токораспределение в схеме рис. 25 практически совпадает с токораспределением на рис. 23,а.

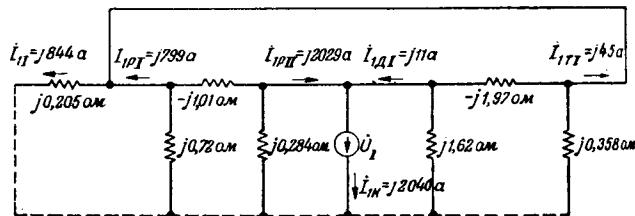


Рис. 25. Схема замещения положительной (отрицательной) последовательности без трансформаторных связей для случая повреждения в точке  $K_2$  (рис. 20).

Из изложенного следует, что предлагаемые методы вычисления токов и напряжений в схемах, содержащих добавочные устройства для продольного регулирования под нагрузкой, достаточно просты. В инженерных расчетах удобно применять эквивалентные схемы рис. 13, на основании которых находятся токи положительной и отрицательной последовательностей аварийного режима, притекающие с двух сторон к месту повреждения, после чего нетрудно определить токи и на других участках схемы.

Применение полученных в настоящей работе соотношений при анализе релейной защиты является отдельной темой.

Автор приносит благодарность Б. Я. Смелянской, принявшей участие в исследовании ряда соотношений и в расчетах, и Х. И. Орлову за ценные советы при разработке некоторых вопросов данной статьи.

#### Литература

- Г. Н. Петров. Трансформаторы. ОНТИ, 1934.
- Ю. С. Кронгауз. Мощные трансформаторы с регулируемым под нагрузкой напряжением. Госэнергоиздат, 1940.
- Н. А. Мельников. Расчеты режимов работы сетей электрических систем. Госэнергоиздат, 1950.
- С. А. Ульянов. Короткие замыкания в электрических системах. Госэнергоиздат, 1949.
- Б. П. Асеев. Четырехполюсники. Связьиздат, 1946.
- Н. А. Мельников. Линейная электрическая система с трансформаторными связями. Сборник трудов ВЗЭИ, 1951.

[25. 3. 1952]



# Потенциальная кривая на коллекторе и ее влияние на образование кругового огня

Кандидат техн. наук В. В. ФЕТИСОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

При больших внезапных перегрузках, а также при к. з. машин постоянного тока возможно возникновение кругового огня на коллекторе. Это весьма опасное явление может привести к тяжелой аварии машины, поэтому весьма важно изучить причины его возникновения и меры борьбы с ним.

Различают две возможных причины возникновения кругового огня. Первой из них является [Л. 1, 2, 3] образование в результате расстройства коммутации коммутационных дуг между щетками и сбегающими коллекторными пластинами. Эти дуги при движении коллектора растягиваются и под действием электродинамических сил при наличии благоприятного распределения потенциала с большой скоростью распространяются по коллектору, вызывая вокруг него мощные вспышки огня.

Второй причиной возникновения кругового огня может явиться образование потенциальных дуг [Л. 3, 4, 5, 6] между соседними пластинами в тех местах коллектора, где напряжение между ними достигает наибольшей величины вследствие искажения при толчках тока потенциальной кривой на коллекторе. Коммутационному искрению при этом отводят второстепенную роль, считая, что оно лишь облегчает переход потенциального искрения в круговой огонь, вызывая ионизацию близлежащего пространства над поверхностью коллектора.

Из изложенного ясно, что одним из важнейших факторов, влияющих на возникновение и распространение кругового огня, является распределение потенциала на коллекторе. В литературе, однако, этот вопрос освещен недостаточно полно и не всегда правильно, поэтому автор считает нужным уделить этому некоторое внимание.

**Экспериментальное исследование потенциальной кривой на коллекторе.** Автор произвел экспериментальное исследование потенциальной кривой на коллекторе при к. з. некомпенсированной машины GM-282 118 квт, 440 в, 300 а, 1 000 об/мин. Для определения распределения потенциала по коллектору между отрицательной и положительной группами щеток через определенные расстояния на коллекторной дуге были размещены шесть вспомогательных щеток (рис. 1). К каждой вспомогательной щетке

изложены результаты экспериментального исследования потенциальной кривой на коллекторе при коротком замыкании некомпенсированной машины. Рассмотрено влияние потенциальной кривой на возникновение кругового огня при внезапных перегрузках компенсированного и некомпенсированного генератора и при работе двигателя в режиме ослабленного поля.

и отрицательной группе рабочих щеток подключалась петля осциллографа (1...6), записывающая на осциллограмме потенциал данной точки коллекторной дуги, находящейся на определенном расстоянии

от основных щеток.

На рис. 2 представлена осциллограмма, характеризующая изменение потенциала различных точек коллектора в процессе к. з. машины, работавшей вначале в режиме холостого хода при напряжении 108 в и скорости вращения 980 об/мин. Ток в обмотке якоря на осциллограмме рис. 2 не записан.

По данным других осциллограмм он достигает в этом случае наибольшего значения — 700 а (кратность тока 2,3). Для большей наглядности масштабы для всех петель подобраны одинаковыми, а их нулевые линии совмещены.

По данным осциллограммы рис. 2 на графике рис. 3 построены потенциальные кривые при холостом ходе (кривая 1) и при коротком замыкании в момент всплеска тока в якоре (кривая 3). На том же графике приведены потенциальные кривые, соответствующие холостому ходу при напряжении 224 в и скорости вращения 980 об/мин (кривая 2) и произведенному вслед за этим к. з. при всплеске тока в обмотке якоря 1 080 а (кривая 4).

Рассматривая осциллограмму рис. 2 и графики рис. 3, можно сделать следующие выводы:

1. При к. з. некомпенсированной машины распределение потенциала на коллекторе, отвечающее холостому ходу машины, очень сильно изменяется, причем почти на всей коллекторной дуге потенциал приобретает обратный знак.

2. Напряжение между щеткой и сбегающей коллекторной пластиной по мере удаления пласти-

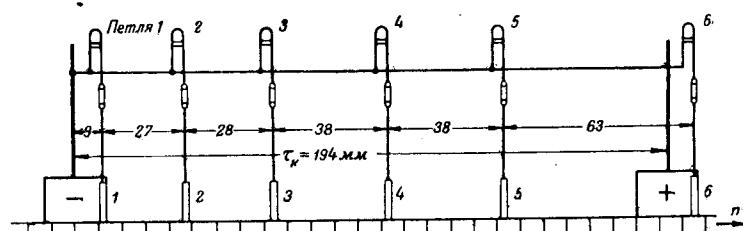


Рис. 1. Схема расположения вспомогательных щеток на коллекторе.

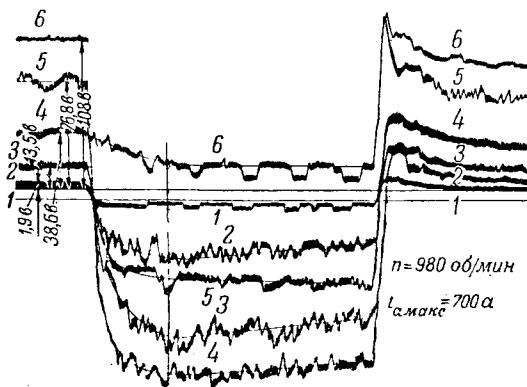


Рис. 2. Осциллограмма изменения потенциала точек коллектора при коротком замыкании некомпенсированного генератора.

ны сначала заметно возрастает, достигает максимума где-то около середины коллекторной дуги, затем уменьшается, переходит через нуль и достигает величины  $u_{\text{щ}}$ , равной падению напряжения в обмотке добавочных полюсов и проводниках, замыкающих накоротко зажимы машины.

3. При увеличении напряжения на зажимах машины величина наибольшего отрицательного потенциала на коллекторе в режиме к. з. возрастает в меньшей степени, чем напряжение машины до к. з.

4. Потенциальные кривые под щетками имеют вид, обычный для случая резкозамедленной коммутации, когда напряжение под сбегающими краями щеток достигает величины, достаточной для образования коммутационных дуг.

Описанный характер потенциальной кривой на коллекторе при к. з. машины объясняется следующими причинами:

1. Поперечная реакция якоря, искажая поле

возбуждения машины, вызывает опрокидывание потока и перемагничивание зубцовой зоны под набегающими краями главных полюсов. Вследствие этого в секциях, движущихся в зоне опрокинутого потока, индуцируется э. д. с. обратного по сравнению с э. д. с. в остальной части обмотки знака. Это является причиной нарастания потенциала обратного знака в начале коллекторной дуги. В случае увеличения возбуждения, а следовательно, и возрастания напряжения машины до к. з. искажающее действие поперечной реакции якоря на основное поле машины, а значит и на потенциальную кривую, проявляется относительно слабее.

2. Значительное падение напряжения под сбегающими краями щеток, вызванное резкозамедленной коммутацией, также способствует опрокидыванию потенциальной кривой на коллекторе.

3. Падение напряжения в самой обмотке якоря действует навстречу э. д. с., индуцируемой в ней результирующим потоком, и, таким образом, также вызывает увеличение потенциала обратного знака на коллекторе.

В случае компенсированной машины, в которой поперечное поле якоря невелико и искажение основного поля при к. з. незначительно, первый из упомянутых факторов, влияющих на опрокидывание потенциальной кривой, отпадает, и распределение потенциала на коллекторе может быть представлено на графике рис. 3 пунктирными кривыми 5 и 6.

**Влияние потенциальной кривой на образование кругового огня.** Из рассмотрения кривых 3 и 4 рис. 3 видно, что при к. з. некомпенсированной машины потенциальная кривая на коллекторе оказывается благоприятной для распространения коммутационных дуг по коллектору, так как напряжение между щеткой и сбегающей коллекторной пластиной по мере движения пластины возрастает.

В дуге, возникшей под сбегающим краем щетки, при движении дуги по коллектору, вследствие ее растягивания как механического, так и под действием электродинамических сил, падение напряжения увеличивается. Это возрастание напряжения в дуге, являющееся условием ее горения, как раз и обеспечивается начальным возрастающим участком потенциальной кривой. Однако при дальнейшем движении дуги напряжение между ее основанием на коллекторе и щеткой, как показывает потенциальная кривая, должно уменьшаться, и дуга гаснет, не достигнув щеток противоположной полярности. Невозможность перекрытия коммутационными дугами всего междущеточного пространства становится ясной также из того, что в этом случае ток через дуги протекал бы от щеток отрицательной полярности к щеткам положительной полярности, т. е. от меньшего потенциала к большему. Последнее утверждение для внешних цепей, не содержащих источников э. д. с., является абсурдным.

В момент погасания дуги, растянутой по коллектору на определенное расстояние, под щетками возникает новая дуга, которая, в свою оче-

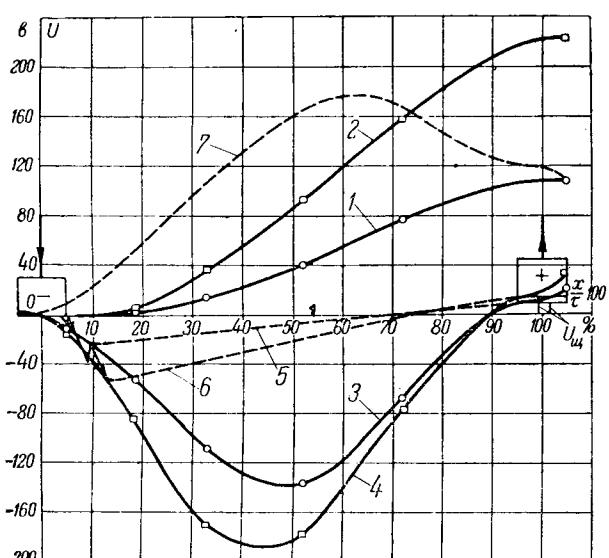


Рис. 3. Потенциальные кривые на коллекторе при холостом ходе (кривые 1 и 2), при коротком замыкании некомпенсированной (кривые 3 и 4) и компенсированной (кривые 5 и 6) машины и при работе машины с ослабленным полем в режиме двигателя (кривая 7).

редь, начинает двигаться по коллектору и затем, пройдя определенное расстояние, гаснет. Описанный процесс повторяется многократно. Изложенная выше картина движения коммутационных дуг по коллектору детально исследована в работах О. Б. Брана [Л. 1].

Необходимо отметить, что при движении коммутационных дуг по коллектору потенциальная кривая претерпевает дополнительные изменения вследствие смещения оси н. с. якоря. При этом небольшой сдвиг оси н. с. якоря из-за возрастаия продольной размагничивающей составляющей н. с. может вызвать еще большее опрокидывание поля под набегающими краями полюсов, способствуя некоторому увеличению потенциала обратного знака на коллекторе. Однако дальнейший сдвиг н. с. якоря вследствие уменьшения по-перечной составляющей вызывает такое перераспределение поля под главными полюсами, которое приводит к снижению потенциала обратного знака и тем самым также способствует погасанию движущейся по коллектору дуги.

Мощность, выделяемая на коллекторе в коммутационных дугах при к. з. машины, может достигать весьма больших величин, превосходящих номинальную мощность машины. Поэтому процесс распространения дуг по коллектору сопровождается сильным звуковым и световым эффектом и может вызвать серьезные повреждения коллектора, щеточного аппарата и обмоток машины. Вследствие ионизации междущеточного пространства возможно образование между коллекторными пластинами потенциальных дуг, значительно усиливающих разрушающее действие кругового огня.

Рассматривая потенциальные кривые при к. з. компенсированной машины (кривые 5 и 6 рис. 3), можно сделать вывод, что распространение коммутационных дуг по коллектору в этом случае затруднено, так как потенциал коллекторных пластин по мере удаления от щеток не увеличивается, а уменьшается. Дуга, возникшая при расстроенной коммутации под сбегающим краем щетки, может поддерживаться в данном случае лишь благодаря действию э. д. с. (главным образом реактивной э. д. с.), индуцируемых в к. з. дугой секциях, и э. д. с. самоиндукции обмоток главной цепи (якоря, добавочных полюсов, компенсационной), т. е. за счет тех э. д. с., которые возникают при уменьшении тока в самой дуге. Поэтому в компенсированной машине коммутационные дуги должны погасать, пройдя лишь небольшое расстояние по коллектору, и возникновение кругового огня затруднено.

Кроме того, вследствие более равномерного распределения потенциала по коллектору наибольшее напряжение между соседними коллекторными пластинами в компенсированной машине оказывается меньше, чем в некомпенсированной. Поэтому образование потенциальных дуг в компенсированной машине также более затруднено.

Таким образом, некомпенсированная машина подвержена опасности возникновения кругового огня в гораздо большей степени, чем компенсиро-

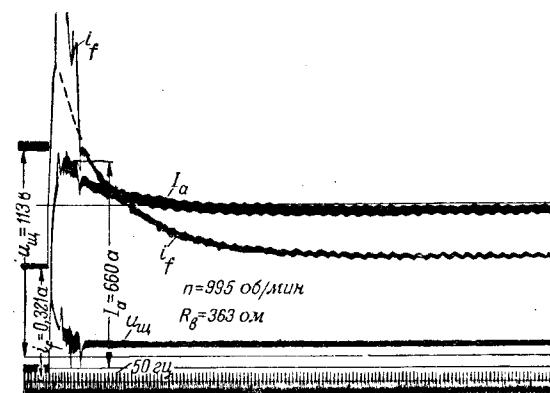


Рис. 4. Оциллограмма внезапного короткого замыкания генератора независимого возбуждения при  $u_0 = 113$  в и  $n = 995$  об/мин; к. з. сопровождалось вспышкой огня на коллекторе.

ванная. Возникновение кругового огня в некомпенсированной машине можно иллюстрировать следующими примерами.

Вспышки огня на коллекторе некомпенсированной машины GM-282 наблюдались при к. з. ее, производимом во время работы машины в режиме холостого хода при номинальной скорости и напряжении 110 в ( $1/4$  от номинального). При дальнейшем увеличении напряжения интенсивность вспышек огня значительно возрастила. На рис. 4 приведена осциллограмма изменения тока в обмотке якоря  $I_a$ , тока возбуждения  $i_f$  и напряжения на щетках  $u_w$  в процессе к. з. машины, развивавшей в режиме холостого хода напряжение 113 в при скорости 980 об/мин. Короткое замыкание сопровождалось вспышкой огня на коллекторе. Рассматривая осциллограмму, можно заметить следующее:

1. Напряжение на щетках во время вспышки совершает быстрые колебания, вызванные движением коммутационных дуг, их погасаниями и возникновениями, причем в начальный момент образования вспышки напряжение на щетках несколько возрастает. Последнее, повидимому, объясняется тем, что при перемещении дуги по коллектору она шунтирует те секции обмотки якоря, в которых опрокинутым потоком индуцируется встречно направленная э. д. с.

2. Ток в к. з. цепи, несколько возрастаая, в первый момент также претерпевает колебания. Интересно отметить то обстоятельство, что средняя величина тока в цепи остается почти такой же, как и в случае отсутствия вспышки на коллекторе.

3. В обмотке возбуждения возникает значительный дополнительный всплеск тока (луч петли, записывающий этот ток на осциллограмме, вышел за пределы бумаги). Для сравнения на осциллограмме пунктирной линией нанесен ток возбуждения при отсутствии вспышки на коллекторе.

Большой всплеск тока в обмотке возбуждения объясняется действием продольной реакции якоря, возникающей при движении коммутационных дуг и также поэтому имеющей колебательный характер.

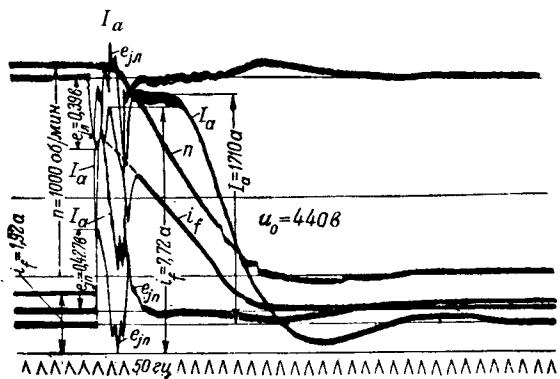


Рис. 5. Осциллограмма внезапного к. з. на выбеге генератора независимого возбуждения при  $u_0 = 440$  в; к. з. сопровождалось вспышкой огня на коллекторе.

Вышеизложенные замечания позволяют сделать вывод, что в данном случае вспышка огня на коллекторе возникла вследствие образования дуг, вызванных расстройством коммутации, и распространения этих дуг по коллектору.

При выполнении дальнейших опытов для предотвращения распространения коммутационных дуг и возникновения огня на коллекторе вблизи сбегающих краев щеток были поставлены асbestosовые перегородки, а между щетками и перегородками были помещены асbestosовые валики, соприкасающиеся одной стороной с поверхностью коллектора. Создание таких изолирующих барьеров оказалось довольно эффективным средством, препятствующим распространению коммутационных дуг по коллектору. Однако, как показали опыты, несмотря на наличие барьеров, образование кругового огня при к. з. машины все же оказалось возможным. На рис. 5 приведена осциллограмма, дающая зависимость  $I_a$ ,  $i_f$ ,  $n=f(t)$  при к. з. на выбеге машины, развивавшей в режиме холостого хода напряжение  $u_0 = 440$  в при nominalной скорости  $n = 1000$  об/мин.

Кроме того, на осциллограмме засняты э. д. с.  $e_{jlev}$  и  $e_{jopr}$ , индуцируемые во вспомогательных катушках, расположенных на станине слева и справа от главного полюса и характеризующие изменение потока в станине.

Из приведенной осциллограммы видно, что при образовании огня на коллекторе: 1) ток во внешней цепи снизился до 30% своей наибольшей величины; 2) ток в обмотке возбуждения несколько возрос, но не столь значительно, как в предыдущем случае; 3) поток добавочных полюсов, замыкающийся через станину, уменьшился; 4) падение скорости вследствие уменьшения тормозного момента не столь велико, как в случае отсутствия вспышки на коллекторе.

На основании этого можно сделать заключение, что в данном случае возникновение огня произошло не вследствие расстройства коммутации, а в результате образования потенциальных дуг на коллекторе, шунтирующих внешнюю цепь машины и снижающих поэтому величину тока в ней.

**Потенциальные кривые для двигательного режима машины.** Так как направление тока в цепь якоря в двигательном режиме меняется, то: 1) поперечное поле якоря изменяет свой знак, намагничивая набегающий и размагничивая сбегающий край полюса; поэтому э. д. с. обратного знака может индуцироваться в секциях, движущихся под сбегающими краями полюсов; 2) изменяется знак потенциальной кривой под щетками; 3) изменяется знак падения напряжения в обмотке якоря, которое в данном случае способствует нарастанию положительного потенциала по коллектору.

В результате этого потенциальная кривая при удалении от сбегающих краев щеток круто нарастает, особенно при ослабленном поле [Л. 5], и затем идет более полого или даже падает вниз, достигая величины, равной приложеному напряжению сети (кривая 7, рис. 3). В данном случае потенциальная кривая также является благоприятной для распространения коммутационных дуг, так как она не пересекает оси абсцисс, то распространение коммутационных дуг не ограничено и может привести к перекрытию дугой всего междущеточного пространства.

С этой точки зрения легко объяснимо явление возникновения кругового огня при обрыве цепи возбуждения двигателя. При этом происходит следующее: 1) благодаря возрастанию тока в цепи якоря и возрастанию скорости вращения двигателя, идущего в разнос, правильная коммутация нарушается и под сбегающими краями щеток возникают коммутационные дуги; 2) поле в воздушном зазоре сильно искажается под действием поперечной реакции якоря при ослабленном поле возбуждения, которое поддерживается лишь за счет остаточного магнетизма и н. с. коммутационных токов; 3) вследствие этого потенциальная кривая на коллекторе искажается и приближается к кривой 7 рис. 3, способствуя распространению коммутационных дуг и образованию огненного кольца вокруг всего коллектора.

**Выводы.** Из всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Влияние потенциальной кривой на образование кругового огня при перегрузках и в переходных режимах весьма велико, так как при этом распределение потенциала на коллекторе может способствовать как распространению коммутационных дуг по коллектору, так и возникновению потенциальных дуг между пластинами.

2. Образование кругового огня в компенсированных машинах весьма затруднено, так как выравнивание потенциала на коллекторе затрудняет распространение коммутационных и возникновение потенциальных дуг.

3. В некомпенсированных машинах постоянно го тока круговой огонь наиболее часто вызывается расстройством коммутации, особенно в переходных процессах и при многократных перегрузках, но возможны случаи образования кругового огня, особенно у высоковольтных машин, вследствие возникновения потенциальных дуг.

4. Наиболее эффективными мерами борьбы с круговым огнем являются устройство компенсационной обмотки и настройка правильной коммутации также и для режимов перегрузки и переходных режимов, что достигается применением расслоенных станин и сердечников добавочных полюсов, правильным выбором сечения сердечников добавочных полюсов, обеспечивающих их работу в ненасыщенном состоянии. Устройство перегородок и барьеров не является радикальным средством борьбы с круговым огнем, так как оно не устраняет причин возникновения коммутационных и потенциальных дуг, а лишь затрудняет их распространение.

### Литература

1. О. Б. Брон и В. С. Александров. Круговой огонь на коллекторе машины постоянного тока. Электричество, № 3, 1935.
2. С. Б. Юдиккий. Коммутация машин постоянного тока. Госэнергоиздат, 1941.
3. Н. П. Ермолин. Коммутация машин постоянного тока при кратковременных перегрузках, Электричество, № 6, 1947.
4. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть. Госэнергоиздат, стр. 400, 1949.
5. Э. Арнольд и Н. Лакур. Машины постоянного тока, т. 1, стр. 146 и 149. ГНТИ, 1931.
6. T. M. Linville. Current and Torque of D-C Machines on Short Circuit. AIEE Trans. V. 65, стр. 956, 1949.

[12. 7. 1951]



## Анализ тока статора при гармоническом пульсирующем моменте синхронной машины

Кандидат техн. наук И. Д. УРУСОВ

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

**Введение.** Синхронная машина довольно часто сочленяется с механизмом возвратно-поступательного движения и работает, таким образом, при периодической пульсации врачающего момента на ее валу. Примерами могут служить случаи работы синхронной машины в качестве дизельного или локомотивного генератора, а также, и, главным образом в качестве компрессорного электродвигателя. При проектировании синхронных машин для названных условий работы к ней предъявляются следующие основные требования: 1) обеспечение устойчивости параллельной работы машины в сети; 2) ограничение пульсаций тока заданными величинами, без излишнего утяжеления агрегата добавочными массами, предназначаемыми для создания махового момента.

**Динамическая схема работы.** В практическом расчёте колебаний исходят обычно из следующих рассуждений.

При малых периодических колебаниях  $\Delta\delta$  угла рассогласования  $\delta$  около его среднего положения, соответствующего средней мощности, развиваемой машиной, синхронизирующий момент и демпферный (асинхронный) момент с достаточной для практики точностью принимаются линейными функциями: первый — от угла  $\Delta\delta$ , второй — от скорости изменения  $\Delta\delta$  во времени  $\left(\frac{d\delta}{dt}\right)$ .

Предлагаемый метод основан на применении упрощенного операторного выражения для реактивности  $x_d(p)$ . Показано, что при гармоническом характере изменения момента на валу машины геометрическим местом статорного тока является эллипс, и даны формулы для расчета его элементов. Приведен числовой пример.

Это обстоятельство позволяет применить к ротору линейное дифференциальное уравнение динамики<sup>1</sup>:

$$+ M_s \Delta\delta = \sum_{k=1}^{k=m} M_k \sin(\omega_k t + \gamma_k), \quad (1)$$

решение которого для установившегося режима дает мгновенные значения синхронизирующего момента  $y$  в долях единицы:

$$y = M_{so} \Delta\delta = M_{so} \Sigma \delta_k = \sum_{k=1}^{k=m} \frac{M_k \sin(\omega_k t + \gamma_k - \phi_k)}{\sqrt{(1 - Z k^2)^2 + k^2 \lambda^2}}, \quad (2)$$

где

$$Z = \frac{J' \omega_1^2}{m_N M_{so}} = 2,5 \frac{GD^2}{m_N M_{so}} \left(\frac{10}{p}\right)^3 = \frac{GD^2}{GD_1^2},$$

$GD_1^2 = 0,4 m_N M_{so} \left(\frac{p}{10}\right)^3$  — маховой момент ротора, соответствующий резонансу 1-й гармоники внешнего момента;

<sup>1</sup> Основные обозначения приведены в конце статьи.

$\lambda = \frac{M_a \omega_1}{M_{so}}$  — коэффициент демпфирования.

$$c_k = \frac{1}{\sqrt{(1 - Zk^2)^2 + \lambda^2 k^2}}$$

обычно называют коэффициентом усиления  $k$ -той гармоники. Сдвиг фаз между  $k$ -той гармоникой внешнего момента и гармоникой обусловленного ею момента двигателя

$$\phi_k = \arctg \frac{k\lambda}{1 - k^2 Z}.$$

Типичный резонансный спектр коэффициентов усиления 1-й, 2-й и 3-й в зависимости от  $Z$  приведен на рис. 1.

Наибольшее значение угла периода одного оборота машины находится путем графического суммирования гармоник. Затем по векторной диаграмме определяются соответствующие пульсации статорного тока  $i_{\max} - i_{\min}$  и обычно, пользуясь упрощенной векторной диаграммой,

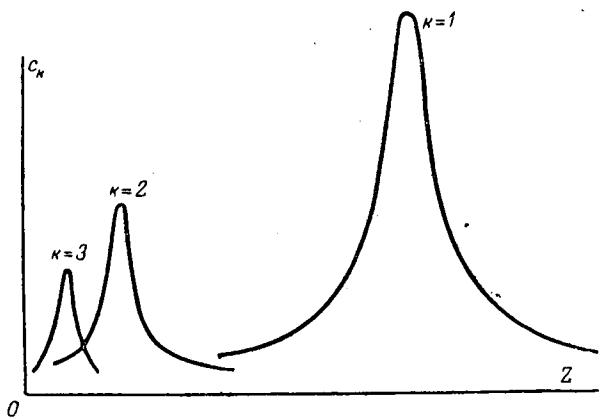


Рис. 1. Резонансный спектр синхронного двигателя при  $M_1 = M_2 = M_3 = 1$ .

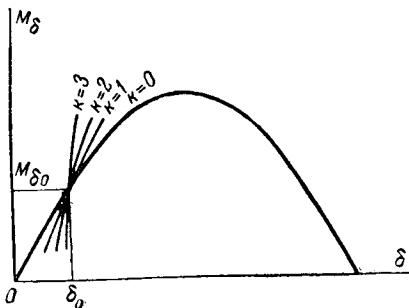


Рис. 2. Синхронизирующий момент при различных частотах пульсации вращающего момента.

получают при малых  $\delta$  приближенное соотношение:

$$i_{\max} - i_{\min} = y \cos \varphi. \quad (3)$$

Задача проектирующего состоят в том, чтобы, пользуясь данными разложения кривой внешнего момента в гармонический ряд и параметрами намеченного варианта синхронной машины, построить график пульсации статорного тока в за-

висимости от махового момента. На основании этого графика, задаваясь допустимым значениями пульсации, может быть выбран потребный маховой момент, скорректированы в нужном направлении параметры машины и пересмотрен исходный вариант электрического расчета.

**Погрешности метода.** Изложенный выше метод не является достаточно точным для практических целей.

Физическая сущность явлений, которые не учитываются в этом методе, заключается в следующем:

а) При наличии колебательного с частотой  $\omega$  движения ротора в магнитном поле статоре в обмотках ротора наводятся переходные токи, которые стремятся сохранить неизменными потокосцепления ротора. Возникновение этих токов равносильно принудительному периодическому изменению тока возбуждения. Характерно, что при увеличении угла  $\delta$  переходный ток ротора действует согласно с н. с. возбуждения, а при уменьшении  $\delta$  наоборот. Благодаря этому характеристика мощности, проходя попрежнему через точку  $M_{so}$ , меняет наклон, причем увеличению частоты колебаний ротора соответствует до известного предела возрастание крутизны характеристики мощности, которое не учитывается статической диаграммой мощности ( $k=0$ ), рис. 2.

б) Возникновение переходных токов в роторных цепях вызывает ответные пульсации статорного тока такой величины, при которой обеспечивается постоянство потокосцеплений статорной обмотки.

Указанные пульсации статорного тока не учитываются векторной диаграммой статического режима, хотя относительная их величина часто оказывается весьма существенной и нуждается в более точном расчете.

в) Определение демпферного момента  $M_a$  из усредненной пусковой характеристики также недостаточно точно, так как демпфирующее действие обмоток ротора в осях  $d$  и  $q$  неодинаково и зависит, как показывает исследование, от частоты колебаний и значения угла  $\delta_0$ , соответствующего средней мощности. Например, при  $\delta_0$  близком к нулю, почти все демпфирующее действие принадлежит поперечной обмотке, при  $\delta_0$  близком к  $\frac{\pi}{2}$ , наоборот, работает в основном только продольная обмотка. Это обстоятельство требует внесения соответствующего уточнения также и в расчет удельного демпферного момента.

Приведенное ниже исследование (приложения I и II) показывает, что, несмотря на характер процесса, осложненного влиянием переходных роторных токов, синхронизирующий момент при малых колебаниях угла  $\delta$  остается линейной функцией от  $\Delta\delta$ , равно как и асинхронный момент — линейной функцией от  $\frac{d\Delta\delta}{dt}$ . Но в отличие от описанного метода для каждой гармоники внешнего момента соответствующие коэффициенты этих моментов получают различные зна-

чения, зависящие как от частоты качаний  $\omega_k$ , так и от величины среднего угла рассогласования  $\delta_o$ . Таким образом, для каждой гармоники  $M_{sk} = \text{пост}$  и  $M_{ak} = \text{пост}$ . Это обстоятельство позволяет сохранить в силе линейную динамическую схему со свойственной ей простотой аналитического решения и предложить на базе этой схемы уточненный метод расчета.

**Уточненный метод расчета.** Ниже изложен практический метод, иллюстрируемый численным примером расчета пульсаций токов и выбора махового момента для компрессорного двигателя  $P_N = 625 \text{ квт}$ , с учетом переходных роторных токов (вывод соотношений дан в приложениях I и II).

**Пример.** Рассчитать график пульсаций тока в зависимости от махового момента для компрессорного электродвигателя, имеющего следующие данные:

$$P_N = 625 \text{ квт}; \cos \varphi = 0,9; U = 6000 \text{ в};$$

$$n = 167 \text{ об/мин};$$

$$2\varphi = 36; m_N = 975 \frac{760}{167} = 4450 \text{ кг}\cdot\text{м};$$

$$M_1 = 0,125; M_2 = 0,23; v_1 = 0; v_2 = \frac{\pi}{2};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{p} = \frac{1}{18};$$

$$\omega_2 = 2\omega_1 = \frac{1}{9}; T_1 = 2\pi p = 113 \text{ эл.сек.}$$

Реактивности в долях единицы  $x_d = 0,83; x_q = 0,53; x_d' = 0,364; x_d'' = 0,219; x_q'' = 0,22$ .

Постоянные времени в электрических секундах

$$T_d = 271; T_d' = 118; T_e = 16,6; T_e' = 4,85;$$

$$T_{do}'' = 7,05; T_d'' = 4,23; T_q = 12,3; T_q'' = 5,1.$$

Данные статического режима:

$$\delta_o = 0,387; \sin \delta_o = 0,361; \cos \delta_o = 0,932;$$

$$\cos 2\delta_o = 0,788;$$

$$\operatorname{tg} \varphi = 1,08; \sin \varphi = 0,735; E = 1,54; M_{so} = 2,23;$$

$$i_{do} = 0,735; i_{qo} = 0,68.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 1 и 2 (см. также рис. 3 и 4).

**Приложение 1. Вывод формул вращающего момента.** Воспользуемся операторным уравнением вращающего момента синхронной машины при пренебрежении активным сопротивлением обмотки статора:

$$\begin{aligned} M &= \frac{Ee}{x_d} \sin \delta + \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} e^2 \sin 2\delta + \\ &+ e^2 \cos \delta \frac{x_q - x_q(p)}{x_q x_q(p)} (\sin \delta - \sin \delta_o) + \\ &+ e^2 \sin \delta \frac{x_d - x_d(p)}{x_d x_d(p)} (\cos \delta_o - \cos \delta). \end{aligned} \quad (I,1)$$

Выразим угол рассогласования  $\delta$  как сумму:

$$\delta = \delta_o + \Delta \delta$$

и заметим, что при малых величинах приращения  $\Delta \delta$  можно принять:

$$\sin \Delta \delta \approx \Delta \delta, \cos \Delta \delta \approx 1, (\Delta \delta)^2 \approx 0.$$

В таком случае выражение (I,1) после преобразований примет вид:

$$M = M_{\delta o} + M_{so} \Delta \delta + e^2 \frac{\Delta \delta}{z(p)}, \quad (I,2)$$

$$\text{где } M_{\delta o} = \frac{Ee}{x_d} \sin \delta_o + e^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} \sin 2\delta_o, \quad (I,3)$$

статический момент синхронной машины при  $\delta = \delta_o$ :

$$M_{so} = \frac{Ee}{x_d} \cos \delta_o + e^2 \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \cos 2\delta_o \quad (I,4)$$

— удельный синхронизирующий момент, соответствующий статическому режиму при  $\delta = \delta_o$ . Выражение  $e^2 \frac{\Delta \delta}{z(p)}$  дает дополнительный момент, обусловленный переходными токами в роторных цепях, где

$$\frac{1}{z(p)} = \frac{x_q - x_q(p)}{x_q x_q(p)} \cos^2 \delta_o + \frac{x_d - x_d(p)}{x_d x_d(p)} \sin^2 \delta_o. \quad (I,5)$$

Для исследования этого дополнительного момента при установившемся гармоническом, с частотой  $\omega_k$ , колебании угла  $\Delta \delta_k = \Delta \delta_{mk} \sin \omega_k t$  надлежит в общем виде принять:

$$\Delta \delta_k = \Delta \delta_{mk} e^{j\omega_k t} = \Delta \delta_{mk} (\cos \omega_k t + j \sin \omega_k t). \quad (I,6)$$

В таком случае, используя теорему разложения для гармонических функций и полагая  $p = j\omega$ , получим решение для установившихся колебаний:

$$\begin{aligned} e^2 \frac{\Delta \delta}{z(p)} &\div \Delta \delta_{mk} e^2 \left( \frac{e^{j\omega_k t}}{z(j\omega_k)} \right)_M = \\ &= e^2 \left[ \left( \frac{\cos \omega_k t}{z(j\omega_k)} \right)_M + \left( \frac{\sin \omega_k t}{z(j\omega_k)} \right)_D \right] \Delta \delta_{mk}. \end{aligned} \quad (I,7)$$

Выясним характер каждого из слагаемых в выражении (I,7), для чего запишем его в форме:

$$\begin{aligned} e^2 \frac{\Delta \delta}{z(p)} &\div e^2 \left( \frac{\sin \omega_k t}{z(j\omega_k)} \Delta \delta_{mk} \right)_D + \\ &+ \left( \frac{1}{\omega_k z(j\omega_k)} \frac{d}{dt} (\Delta \delta_{mk} \sin \omega_k t) \right)_M, \end{aligned} \quad (I,8)$$

откуда видно, что

$$\left( \frac{e^2}{z(j\omega_k)} \right)_D = \Delta M_{sk} \quad (I,9)$$

— линейное приращение удельного синхронизирующего момента, результирующая величина которого при малых качаниях, таким образом, будет:

$$M_{sk} = M_{so} + \Delta M_{sk}.$$

Второе же слагаемое в выражении (I,8)

$$\left( \frac{e^2}{\omega_k z(j\omega_k)} \right)_M = M_{ak}, \quad (I,10)$$

представляющее собой множитель при  $\frac{d(\Delta \delta)}{dt}$ , является удельным асинхронным моментом, численно равным асинхронному моменту при  $s = 1$ . На основании (I,2), (I,8), (I,9) и (I,10) можно написать:

$$\begin{aligned} M &= M_{\delta o} + M_{so} \Delta \delta_k + \Delta M_{sk} \Delta \delta_k + \\ &+ M_{ak} \frac{d(\Delta \delta_k)}{dt} = M_{\delta o} + (M_{so} + \Delta M_{sk}) \Delta \delta_k + \\ &+ M_{ak} \frac{d(\Delta \delta_k)}{dt} = M_{\delta o} + \left[ M_{so} + \left( \frac{e^2}{z(j\omega_k)} \right)_D \right] \Delta \delta_k + \\ &+ \left( \frac{e^2}{\omega_k z(j\omega_k)} \right)_M \frac{d(\Delta \delta_k)}{dt}. \end{aligned} \quad (I,11)$$

<sup>2</sup>  $M$ ,  $\delta$  — символы мнимой и действительной частей.

Таблица 1

Порядок гармоники $k$		
	$k=1$	$k=2$
Расчетные величины		
$\mu_q'' = \frac{T_1}{2\pi k T_q''} =$	$\frac{113}{2\pi \cdot 5,1} = 3,53$	$\frac{3,53}{2} = 1,76$
$\mu_d' = \frac{T_1}{2\pi k T_d'} =$	$\frac{113}{2\pi \cdot 118} = 0,152$	$\frac{0,152}{2} = 0,076$
$\mu_d'' = \frac{T_1}{2\pi k T_d''} =$	$\frac{113}{2\pi \cdot 4,25} = 4,23$	$\frac{4,23}{2} = 2,12$
$c_d'' = \frac{x_q - x_q''}{x_q x_q''} \frac{1}{1 + \mu_q''^2} =$	$\frac{0,53 - 0,22}{0,53 \cdot 0,22} \cdot \frac{1}{1 + 3,53^2} = 0,198$	$2,66 \frac{1}{1 + 1,76^2} = 0,65$
$c_d' = \frac{x_d - x_d'}{x_d x_d'} \frac{1}{1 + \mu_d'^2} =$	$\frac{0,83 - 0,364}{0,83 \cdot 0,364} \cdot \frac{1}{1 + 0,152^2} = 1,51$	$1,54 \frac{1}{1 + 0,076^2} \approx 1,54$
$c_d'' = \frac{x_d' - x_d''}{x_d' x_d''} \frac{1}{1 + \mu_d''^2} =$	$\frac{0,364 - 0,22}{0,364 \cdot 0,22} \frac{1}{1 + 4,23^2} = 0,1$	$1,8 \frac{1}{1 + 2,12^2} = 0,327$
$a_q'' = c_q'' \mu_q'' =$	$0,198 \cdot 3,53 = 0,7$	$0,65 \cdot 1,76 = 1,145$
$a_d' = c_d' \mu_d' =$	$1,51 \cdot 0,152 = 0,23$	$1,54 \cdot 0,076 = 0,117$
$a_d'' = c_d'' \mu_d'' =$	$0,1 \cdot 4,23 = 0,423$	$0,327 \cdot 2,12 = 0,694$
$\Delta M_{sk} = e^2 [c_q'' \cos^2 \delta_o + (c_d' + c_d'') \sin^2 \delta_o] =$	$0,198 \cdot 0,932^2 + 1,61 \cdot 0,361^2 = 0,382$	$0,65 \cdot 0,932^2 + 1,87 \cdot 0,361^2 = 0,809$
$M_{sk} = M_{so} + \Delta M_{sk} =$	$M_{s1} = 2,23 + 0,382 = 2,61$	$M_{s2} = 2,23 + 0,809 = 3,04$
$M_{ak} = e^2 [a_q'' \cos^2 \delta_o + (a_d' + a_d'') \sin^2 \delta_o] \frac{1}{\omega_k} =$	$M_{a1} = (0,7 \cdot 0,932^2 + 0,65 \cdot 0,361^2) \frac{1}{18} = 12,45$	$M_{a2} = (1,14 \cdot 0,932^2 + 0,81 \cdot 0,361^2) \frac{18}{2} = 9,9$
$a_k = \operatorname{arctg} \frac{a_d' + a_d''}{1/x_d + c_d' + c_d''} =$	$a_1 = \operatorname{arctg} \frac{0,653}{2,81} = 0,23$	$a_2 = \operatorname{arctg} \frac{0,811}{3,08} = 0,26$
$\beta_k = \operatorname{arctg} \frac{a_q''}{1/x_q + c_q''} =$	$\beta_1 = \operatorname{arctg} \frac{0,7}{2,08} = 0,326$	$\beta_2 = \operatorname{arctg} \frac{1,145}{2,53} = 0,425$
$A_k = \sqrt{(1/x_d + c_d' + c_d'')^2 + (a_d' + a_d'')^2} =$	$\sqrt{\left(\frac{1}{0,83} + 1,61\right)^2 + 0,653^2} = 2,86$	$\sqrt{\left(\frac{1}{0,83} + 1,87\right)^2 + 0,81^2} = 3,17$
$B_k = \sqrt{\left(\frac{1}{x_q} + c_q''\right)^2 + a_q''^2} =$	$\sqrt{\left(\frac{1}{0,53} + 0,198\right)^2 + 0,7^2} = 2,2$	$\sqrt{\left(\frac{1}{0,53} + 0,65\right)^2 + 1,145^2} = 2,78$

Для получения окончательных формул вращающего момента необходимо подставить (I,5) в (I,11), полагая при этом  $p=j\omega_k$  и используя известные выражения операторных реактивностей:

$$x_d(p) = x_d \frac{T_d' T_d'' p^2 + (T_d' + T_c') p + 1}{T_d T_{do}'' p^2 + (T_d + T_c) p + 1}, \quad (I,12)$$

$$x_q(p) = x_q \frac{T_q' p + 1}{T_q p + 1}. \quad (I,13)$$

Однако непосредственная подстановка выражения (I,12) в (I,5) приводит к весьма громоздким выражениям, мало пригодным для практического использования [Л. 2]. Задача может быть значительно упрощена, если учесть, что постоянные времени демпферных цепей малы по сравнению с постоянной времени цепи возбуждения, и применить приближенное уравнение, используемое часто при рассмотрении переходных режимов в синхронных машинах:

$$\frac{x_d - x_d(p)}{x_d x_d(p)} \approx \frac{x_d - x_d'(p)}{x_d x_d'(p)} + \frac{x_d' - x_d''(p)}{x_d' x_d''(p)}; \quad (I,14)$$

здесь

$$x_d'(p) = x_d \frac{p T_d' + 1}{p T_d + 1}, \quad (I,15)$$

$$x_d''(p) = x_d \frac{p T_d'' + 1}{p T_{do} + 1}; \quad (I,16)$$

$x_d'(p)$  — операторная реактивность по оси  $d$  при разомкнутой демпферной цепи ( $r_f d = \infty$ );  
 $x_d''(p)$  — та же реактивность при сверхпроводимости контура возбуждения ( $r_f = 0$ ).

Выражения (I,15) и (I,16) вытекают из (I,11): первое путем подстановки в него:  $T_d' = T_d'' = T_{do}'' = 0$ ; второе путем подстановкой:  $T_d' = T_d = \infty$ . Таким образом, с физической стороны получается расчленение сложного процесса на два простых; с математической стороны — замена операторного выражения 2-й степени от  $p$  двумя выражениями 1-й степени, чем достигается упрощение окончательных выражений для токов и моментов, и появляется возможность раздельного учета влияния параметров каждой из цепей в каждой оси.

В самом деле, после подстановки (I,13) и (I,14) в (I,5) и простых алгебраических преобразований получаем следующие выражения для моментов:

$$\Delta M_{sk} = e^2 (c_q' \cos^2 \delta_o + c_d' \sin^2 \delta_o + c_d'' \sin^2 \delta_o) \Delta \delta_{mk}, \quad (I,17)$$

$$M_{dk} = e^2 (a_q' \cos^2 \delta_o + a_d' \sin^2 \delta_o + a_d'' \sin^2 \delta_o) \frac{\Delta \delta_{mk}}{\omega_k}, \quad (I,18)$$

и

$$\left. \begin{aligned} c_q' &= \frac{x_q - x_q'}{x_q x_q'} \frac{1}{1 + \left(\frac{T_k}{2\pi T_q'}\right)^2}, \\ c_d' &= \frac{x_d - x_d'}{x_d x_d'} \frac{1}{1 + \left(\frac{T_k}{2\pi T_d'}\right)^2}, \\ c_d'' &= \frac{x_d - x_d''}{x_d x_d''} \frac{1}{1 + \left(\frac{T_k}{2\pi T_d''}\right)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (I,19)$$

$$a_q' = c_q' \frac{T_k}{2\pi T_q'}; \quad a_d' = c_d' \frac{T_k}{2\pi T_d'};$$

$$a_d'' = c_d'' \frac{T_k}{2\pi T_d''}. \quad (I,20)$$

Каждый из коэффициентов  $c$  и  $a$  дает составляющую удельного синхронизирующего или соответственно удельного асинхронного момента, вызванную лишь одной из роторных цепей и лишь в определенной оси.

**Приложение II. Выход формул для составляющих статорного тока.** Принимая во внимание возможные допущения относительно  $\sin \delta$ ,  $\cos \delta$  и  $(\Delta \delta)^2$  при малых  $\delta$  [см. выражение (I,2)], можно для токов статора и ротора написать:

$$i_d = \frac{E}{x_d} - \frac{e}{x_d} (\cos \delta_o - \Delta \delta \sin \delta_o) + \\ + e \frac{x_d - x_d(p)}{x_d x_d(p)} \Delta \delta \sin \delta_o, \quad (II,1)$$

$$i_q = \frac{e}{x_q} (\sin \delta_o + \Delta \delta \cos \delta_o) + \\ + e \frac{x_q - x_q(p)}{x_q x_q(p)} \cos \delta_o \Delta \delta, \quad (II,2)$$

где  $\delta_o$  — начальный угол.

Нетрудно заметить, что в (II,1) и (II,2)

$$\Delta i_d = \frac{e}{x_d} \Delta \delta \sin \delta_o + e \frac{x_d - x_d(p)}{x_d x_d(p)} \sin \delta_o \Delta \delta, \quad (II,3)$$

$$\Delta i_q = \frac{e}{x_q} \Delta \delta \cos \delta_o + e \frac{x_q - x_q(p)}{x_q x_q(p)} \cos \delta_o \Delta \delta \quad (II,4)$$

— приращения токов  $i_d$  и  $i_q$ , обусловленные изменением угла  $\delta$ . Первые члены правых частей (II,3) и (II,4) дают приращения статического режима, вторые — приращения, вызванные переходными токами в роторных контурах.

При малых гармонических колебаниях угла  $\delta$  угол  $\delta_k = \Delta \delta_{mk} \sin \omega_k t$ . Применяя теорему разложения для гармонических функций, как это было сделано при определении моментов (приложение I), и прибегая к простым алгебраическим преобразованиям с использованием обозначений (I,19) и (I,20), получим:

$$\Delta i_{dk} = e A \sin(\omega_k t + \alpha) \sin \delta_o \Delta \delta_{mk}, \quad (II,5)$$

$$\Delta i_{qk} = e B \sin(\omega_k t + \beta) \cos \delta_o \Delta \delta_{mk}, \quad (II,6)$$

где

$$A = \sqrt{\left(\frac{1}{x_d} + c_d' + c_d''\right)^2 + (a_d' + a_d'')^2}, \quad (II,7)$$

$$B = \sqrt{\left(\frac{1}{x_q} + c_q' + c_q''\right)^2 + a_q'^2} \quad (II,8)$$

и

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{a_d' + a_d''}{\frac{1}{x_d} + c_d' + c_d''}, \quad (II,9)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{a_q'}{\frac{1}{x_q} + c_q'}. \quad (II,10)$$

Из уравнений (II,5) и (II,6) видно, что для каждой отдельно взятой гармоники  $k$ -го порядка геометрическим местом конца вектора  $\Delta i_k = \Delta i_{dk} + j \Delta i_{qk}$  является эллипс (рис. 5), элементы которого, найденные путем исключения переменного параметра  $t$ , имеют следующие выражения:

угол наклона большой оси эллипса

$$\gamma = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2AB \sin \delta_o \cos \delta_o \cos(\beta - \alpha)}{A^2 \sin^2 \delta_o - B^2 \cos^2 \delta_o}, \quad (II,11)$$

## Расчет пульсаций

Задается ряд последовательных значений $Z$	0,3	0,5
$GD^2 = 0,4 Z_1 m_N M_{s1} \left(\frac{p}{10}\right)^3 \text{ кгм}^2 =$	$8,1 \cdot 10^3$	$13,5 \cdot 10^3$
Коэффициент усиления		
$c_1 = \frac{1}{\sqrt{(1-Z_1)^2 + \lambda_1^2}} =$	$\frac{1}{\sqrt{0,7^2 + 0,265^2}} = 1,33$	$\frac{1}{\sqrt{0,5^2 + 0,265^2}} = 1,77$
$\Delta\delta_{1m} = \frac{c_1 M_1}{M_{s1}} =$	$\frac{0,125 \cdot 1,33}{2,61} = 0,064$	$\frac{0,125 \cdot 1,77}{2,61} = 0,085$
$\psi_1 = \arctg \frac{\lambda_1}{1-Z_1} =$	$\arctg 0,378 = 0,361$	$\arctg 0,53 = 0,49$
$\Delta i_{1d} = e A_1 \sin \delta_o \sin (\omega_1 t + \nu_1 + \alpha_1 - \psi_1) \Delta\delta_{1m} =$	$0,066 \sin \left( \frac{t}{18} - 0,13 \right)$	$0,0875 \sin \left( \frac{t}{18} - 0,26 \right)$
$\Delta i_{1q} = e B_1 \cos \delta_o \sin (\omega_1 t + \nu_1 + \beta_1 - \psi_1) \Delta\delta_{1m} =$	$0,131 \sin \left( \frac{t}{18} - 0,035 \right)$	$0,174 \sin \left( \frac{t}{18} - 0,164 \right)$
$Z_2 = Z_1 \frac{M_{s1}}{M_{s2}} = 0,86 Z_1 =$	0,256	0,43
$c_2 = \frac{1}{\sqrt{(1-4Z_2)^2 + 4\lambda_2^2}} =$	$\frac{1}{\sqrt{0,025^2 + 0,36^2}} = 2,78$	$\frac{1}{\sqrt{0,72^2 + 0,36^2}} = 1,24$
$\Delta\delta_{2m} = \frac{c_2 M_2}{M_{s2}} =$	$\frac{0,23 \cdot 2,78}{3,04} = 0,21$	$\frac{0,23 \cdot 1,24}{3,04} = 0,094$
$\psi_2 = \arctg \frac{2\lambda_2}{1-4Z_2} =$	$\arctg \left( -\frac{0,36}{0,025} \right) = 1,64$	$\arctg \left( -\frac{0,36}{0,72} \right) = 2,68$
$\Delta i_{2d} = e A_2 \sin \delta_o \sin (\omega_2 t + \nu_2 + \alpha_2 - \psi_2) \Delta\delta_{2m} =$	$0,24 \sin \left( \frac{t}{9} + 0,19 \right)$	$0,108 \sin \left( \frac{t}{9} - 0,85 \right)$
$\Delta i_{2q} = e B_2 \cos \delta_o \sin (\omega_2 t + \nu_2 + \beta_2 - \psi_2) \Delta\delta_{2m} =$	$0,545 \sin \left( \frac{t}{9} + 0,355 \right)$	$0,244 \sin \left( \frac{t}{9} - 0,68 \right)$
$i_{\max}/i_{\min} =$	1,67/0,45	1,42, 0,68
Пульсация тока в %, $i_N$ , т. е. $(i_{\max} - i_{\min}) / 100\%$	122	74

Приложение. Величины  $i_{\max}$  и  $i_{\min}$  определяются из диаграммы тока рис. 3 в осях  $d$  и  $q$ , по которой  $i = i_{do} + \sum_{k=1}^{k=m} \Delta i_{kd} + i'$  расчета представлены на графике рис. 4.

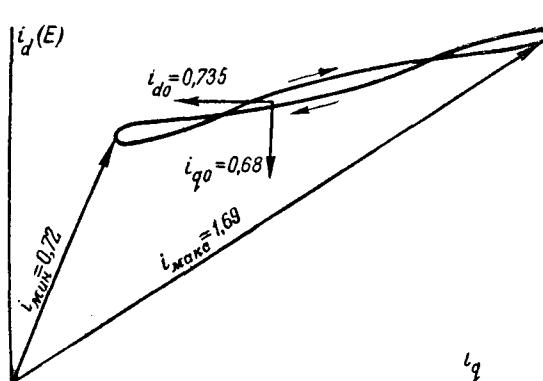


Рис. 3. Векторная диаграмма тока для случая в примере.

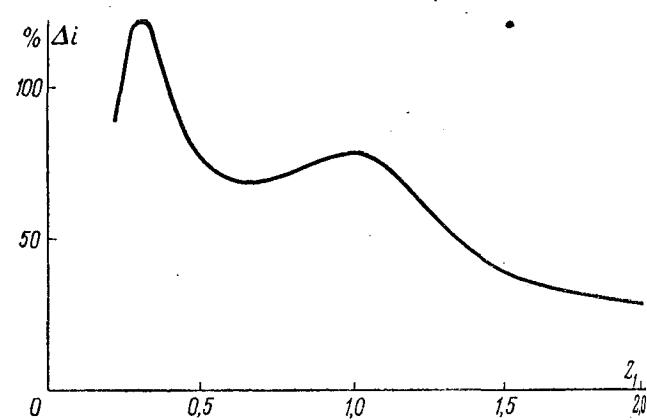


Рис. 4. График пульсаций статорного тока.

статорного тока

Таблица 2

0,7	1,0	1,5	2,0
$18,9 \cdot 10^3$	$27 \cdot 10^3$	$40,5 \cdot 10^3$	$54 \cdot 10^3$
$\frac{1}{\sqrt{0,3^2 + 0,265^2}} = 2,5$	$\frac{1}{\sqrt{0,265^2}} = 3,77$	$\frac{1}{\sqrt{0,5^2 + 0,265^2}} = 1,77$	$\frac{1}{\sqrt{1^2 + 0,265^2}} = 1,03$
$\frac{0,125 \cdot 2,5}{2,61} = 0,12$	$\frac{0,125 \cdot 3,77}{2,61} = 0,181$	$\frac{0,125 \cdot 1,77}{2,61} = 0,085$	$\frac{0,125 \cdot 1,03}{2,61} = 0,05$
$\operatorname{arctg} 0,882 = 0,723$	$\operatorname{arctg} \infty = 1,57$	$\operatorname{arctg} (-0,53) = 2,65$	$\operatorname{arctg} (-0,265) = 2,88$
$0,124 \sin \left( \frac{t}{18} - 0,49 \right)$	$0,186 \sin \left( \frac{t}{18} - 1,34 \right)$	$0,0875 \sin \left( \frac{t}{18} - 2,40 \right)$	$0,0515 \sin \left( \frac{t}{18} - 2,65 \right)$
$0,246 \sin \left( \frac{t}{18} - 0,4 \right)$	$0,37 \sin \left( \frac{t}{18} - 1,24 \right)$	$0,174 \sin \left( \frac{t}{18} - 2,32 \right)$	$0,103 \sin \left( \frac{t}{18} - 2,55 \right)$
0,602	0,86	1,29	1,72
$\frac{1}{\sqrt{1,41^2 + 0,36^2}} = 0,69$	$\frac{1}{\sqrt{2,44^2 + 0,36^2}} = 0,406$	$\frac{1}{\sqrt{4,17^2 + 0,36^2}} = 0,239$	$\frac{1}{\sqrt{5,88^2 + 0,36^2}} = 0,17$
$\frac{0,23 \cdot 0,69}{3,04} = 0,0522$	$\frac{0,23 \cdot 0,406}{3,04} = 0,0308$	$\frac{0,23 \cdot 0,239}{3,04} = 0,0181$	$\frac{0,23 \cdot 0,17}{3,04} = 0,0129$
$\operatorname{arctg} \left( -\frac{0,36}{1,41} \right) = 2,89$	$\operatorname{arctg} \left( -\frac{0,36}{2,44} \right) = 3,0$	$\operatorname{arctg} \left( -\frac{0,36}{4,17} \right) = 3,05$	$\operatorname{arctg} \left( -\frac{0,36}{5,88} \right) = 3,06$
$0,06 \sin \left( \frac{t}{9} - 1,07 \right)$	$0,0352 \sin \left( \frac{t}{9} - 1,17 \right)$	$0,0208 \sin \left( \frac{t}{9} - 1,22 \right)$	$0,0136 \sin \left( \frac{t}{9} - 1,23 \right)$
$0,135 \sin \left( \frac{t}{9} - 0,89 \right)$	$0,08 \sin \left( \frac{t}{9} - 1 \right)$	$0,047 \sin \left( \frac{t}{9} - 1,05 \right)$	$0,0335 \sin \left( \frac{t}{9} - 1,06 \right)$
1,35/0,66	1,35/0,57	1,19/0,82	1,1/0,9
69	78	37	30

$\sum i_{kq}$ . В частном случае при  $m = 1$  диаграмма является эллипсом, элементы которого даются формулами (II,11), (II,15). Результаты

большая ось

$$2a = \sqrt{Q+R} + \sqrt{Q-R}, \quad (\text{II,12})$$

малая ось

$$2b = \sqrt{Q+R} - \sqrt{Q-R}, \quad (\text{II,13})$$

где

$$Q = A^2 \sin^2 \delta_o + B^2 \cos^2 \delta_o, \quad (\text{II,14})$$

$$R = 2AB \sin \delta_o \cos \delta \sin(\beta - a). \quad (\text{II,15})$$

В случае одновременного действия нескольких гармоник геометрическое место конца вектора тока находится суммированием гармоник:

$$\Sigma \Delta i_k = \Sigma \Delta i_{dk} + j \Sigma \Delta i_{qk} \quad (\text{II,16})$$

и графическим построением, как это произведено в рассмотренном выше примере (рис. 3). Получаемые кривые являются разновидностями фигур Лиссажу.

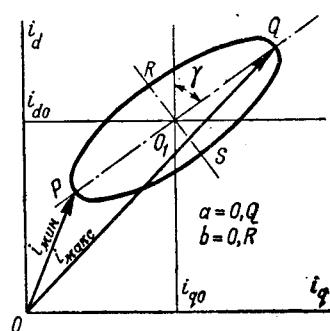


Рис. 5. Векторная эллиптическая диаграмма тока для случая только одной гармоники момента.

## Принятые обозначения

*e* — напряжение на зажимах статора в долях единицы;

*E* — напряжение источника возбуждения в долях того же напряжения при холостом ходе генератора;

*i<sub>d</sub>*, *i<sub>q</sub>* — мгновенные значения составляющих тока статора;

*GD<sup>2</sup>* — маховой момент ротора, кгм<sup>2</sup>;

*g* — ускорение силы тяжести, м/сек<sup>2</sup>;

*i<sub>do</sub>*, *i<sub>qo</sub>* — составляющие тока статора *i<sub>o</sub>*, соответствующего стационарному режиму при  $\delta = \delta_o$ ;

*Δi<sub>dk</sub>*, *Δi<sub>qk</sub>* — мгновенные значения приращений токов *i<sub>d</sub>* и *i<sub>q</sub>*, обусловленных действием *k*-той гармонической внешнего момента;

*J'* =  $\frac{J}{p} = \frac{GD^2}{4gp}$  — приведенный момент инерции массы ротора, кгмэлсек<sup>2</sup>;

*m* — число членов гармонического ряда кривой внешнего момента;

*m<sub>N</sub>* — номинальный момент машины (кгм), рассчитанный по номинальным киловольт-амперам;

*M* — полный электромагнитный момент, развиваемый синхронной машиной в долях единицы;

*M<sub>k</sub>* — амплитуда *k*-той гармоники внешнего момента;

*M<sub>δo</sub>* — момент статического режима при  $\delta = \delta_o$ ;

*M<sub>so</sub>* — удельный синхронизирующий момент статического режима;

*M<sub>sk</sub>* — удельный синхронизирующий момент динамического режима качаний с частотой  $\omega_k$ ;

*ΔM<sub>sk</sub>* — приращение момента *M<sub>so</sub>*, обусловленное динамичностью режима, причем  $M_{sk} = M_{so} + \Delta M_{sk}$ ;

*M<sub>ak</sub>* — удельный асинхронный момент динамического режима качаний с частотой  $\omega_k$  (условно отнесенный к *s* = 1);

*p* — число пар полюсов;

*p* — оператор Хевисайда;

*t* — время, элсек;

*x* — общее обозначение реактивностей, в долях индексация соответствует общепринятым обозначениям;

*y* — синхронизирующий момент в долях единицы;

*T* =  $\frac{2\pi p}{k}$  — период *k*-той гармоники вращающего момента, элсек.

## Постоянныe времена в электрических секундах

а) В продольной оси

*T<sub>d</sub>* =  $\frac{x_f + x_{ad}}{r_f}$  — цепи возбуждения при разомкнутых цепях статорной и демпферной обмоток;

*T<sub>d'</sub>* = *T*  $\frac{x_d}{x_d}$  — цепи возбуждения при замкнутой цепи статора и разомкнутой цепи демпферов;

*T<sub>c</sub>* =  $\frac{1}{r_{kd}} [x_{kd} + x_{ad}]$  — цепи демпферов при разомкнутых цепях статора и возбуждения;

*T<sub>c'</sub>* =  $\frac{1}{r_{kd}} \left[ x_{kd} + \frac{1}{x_{ad} + x_l} \right]$  — цепи демпферов при разомкнутой цепи возбуждения и замкнутой цепи статора;

*T<sub>do</sub>*'' =  $\frac{1}{r_{kd}} \left[ x_{kd} + \frac{1}{x_{ad} + \frac{1}{x_f}} \right]$  — цепи демпферов при разомкнутой цепи статора и замкнутой цепи возбуждения;

*T<sub>d</sub>*'' =  $\frac{1}{r_{kd}} \left[ x_{kd} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_f} + \frac{1}{x_l}} \right]$  — цепи демпферов при замкнутых цепях статора и возбуждения.

б) В поперечной оси

*T<sub>q</sub>* =  $\frac{1}{r_{kq}} (x_{kq} + x_{aq})$  — цепи демпферов при разомкнутой цепи статора;

*T<sub>q</sub>*'' =  $\frac{1}{r_{kq}} \left( x_{kq} + \frac{1}{x_{aq} + x_l} \right)$  — цепи демпферов при замкнутой цепи статора;

$\alpha$  — сдвиг фаз по времени между *Δi<sub>dk</sub>* и *Δδ*;

$\beta$  — то же, между *Δi<sub>qk</sub>* и *Δδ*;

$\gamma$  — угол наклона большой оси эллипса тока к оси *i<sub>d</sub>*;

$\delta$  — угол рассогласования;

$\Delta\delta$  — суммарное приращение угла;

*Δδ<sub>km</sub>* =  $\Delta\delta_{km} \sin \omega_k t$  — мгновенное значение гармонической пульсации угла  $\delta$ , обусловленное только *k*-той гармоникой;

*δ<sub>km</sub>* — амплитуда пульсации угла  $\delta$ , обусловленная *k*-той гармоникой;

$\omega_k$  — угловая частота колебания *k*-той гармоники внешнего момента, причем 1-й считается гармоника, период которой *T<sub>1</sub>* равен продолжительности одного оборота ротора в электроСекундах (*T<sub>1</sub>* =  $2\pi p$ );

$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1}$  — угловая частота 1-й гармоники внешнего момента;

$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1} = \frac{2\pi}{2\pi p} = \frac{1}{p}$  элсек,  $\omega_k = \frac{k}{p}$ ;

$\phi_k$  — сдвиг фаз между *k*-той гармоникой внешнего момента и обусловленной ею гармоникой пульсации *Δδ<sub>k</sub>* угла рассогласования;

$\psi$  — угол внутреннего сдвига между векторами *e* и *E* в диаграмме двух реакций;

$\gamma$  — начальный угол *k*-той гармоники внешнего момента.

## Литература

1. М. П. Костенко. Электрические машины (Специальная часть). Госэнергоиздат, 1949.

2. Р. А. Лютер. О моментах вращения синхронной машины при периодических ее качаниях. Электричество, № 2, 1942.

3. Р. А. Лютер. Теория переходных режимов синхронной машины с применением операторного анализа. Изд. Института повыш. квалификации ИГР, Ленинград, 1939.

4. А. С. Еремеев. Маховой момент агрегата — синхронный электродвигатель и компрессор. Электричество, № 21, 1935.

5. А. А. Горев. Переходные режимы синхронной машины. Госэнергоиздат. 1950.

6. Е. Я. Казовский. Большие качания синхронной машины. Сборник „Электросила“, № 1, 1945.

7. С. А. Лебедев и П. С. Жданов. Устойчивость параллельной работы электрических систем. Изд. ГЭИ, 1934.

[27. 11. 1951]

# О сопротивлении нулевой последовательности асинхронных двигателей

Кандидат техн. наук М. С. ЛЕВИН и кандидат техн. наук П. В. КУЦ

Всесоюзный институт электрификации сельского хозяйства

Величина сопротивления нулевой последовательности играет заметную роль при анализе ряда несимметричных режимов трехфазных асинхронных двигателей, в частности, при их работе в однофазном режиме. Этот режим представляет особый интерес в связи с внедрением в сельскую электрификацию так называемой смешанной (трехфазно-однофазной) системы распределения электроэнергии.

При исследовании схем пуска трехфазных асинхронных двигателей в однофазном режиме авторы столкнулись с невозможностью объяснения ряда процессов, происходящих в двигателе, без правильного качественного и достаточно точного количественного учета сопротивления нулевой последовательности. В связи с указанным обстоятельством возникла необходимость в дальнейшем опытном и теоретическом исследовании сопротивления нулевой последовательности.

Литературные данные о сопротивлении нулевой последовательности, сами по себе довольно немногочисленные, содержат весьма различные, а порой и взаимно исключающие друг друга положения о физической природе и величине этого сопротивления. До настоящего времени не существовало каких-либо строгих соотношений, которые позволили бы вычислить сопротивление нулевой последовательности асинхронных двигателей. Это в значительной степени объясняется тем обстоятельством, что физическая природа сопротивления нулевой последовательности была недостаточно ясна.

Согласно воззрениям ряда американских исследователей [Л. 1], считалось, что токи нулевой последовательности, протекающие в фазах статорной обмотки, смешенных на 120 электрических градусов, не создают магнитного потока, взаимодействующего с ротором. Поток, создаваемый токами нулевой последовательности, рассматривался лишь, как поток рассеяния. Однако это положение справедливо лишь для основной гармоники магнитного потока, и в целом принятая американскими исследова-

Приведены опытные данные о зависимости сопротивления нулевой последовательности асинхронных двигателей от скольжения и от насыщения. Показано, что с помощью метода симметричных составляющих можно выразить токи, напряжения и сопротивление нулевой последовательности через составляющие прямой и обратной последовательности, соответствующие третьей пространственной гармонике магнитного потока двигателя. Получено аналитическое выражение и предложены схемы замещения для сопротивления нулевой последовательности.

телями физическая картина не соответствует действительности. Токи нулевой последовательности, протекающие по обмоткам трехфазной машины, как нетрудно убедиться из рис. 1, создают пульсирующее магнитное поле с числом полюсов в 3 раза больше, чем конструктивное число полюсов машины. Это пульсирующее поле проникает в ротор и при малом воздушном зазоре заметно взаимодействует с токами, индуцированными в роторе. Поэтому в машинах с короткозамкнутым ротором токи нулевой последовательности могут создавать вращающий момент, а величина сопротивления нулевой последовательности зависит от скольжения [Л. 2, 3].

На рис. 2 показаны полученные опытным путем зависимости от тока нулевой последовательности индуктивного сопротивления нулевой последовательности двигателя мощностью 1,5 квт при различных скоростях вращения. Подобные зависимости были получены для пяти других испытанных двигателей. Для всех двигателей характерным является резко выраженный максимум в значении сопротивления нулевой последовательности при скольжении, соответствующем  $1/3$  синхронной скорости двигателя. Кроме

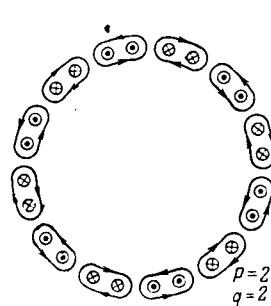


Рис. 1. Магнитные потоки, образуемые токами нулевой последовательности в двигателе с  $p=2$  и  $q=2$ .

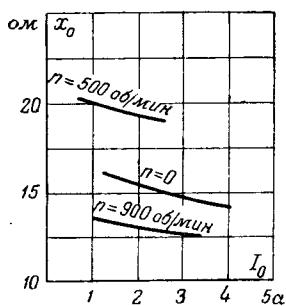


Рис. 2. Зависимости индуктивного сопротивления нулевой последовательности от скорости вращения двигателя и от тока нулевой последовательности (двигатель 1,5 квт).

того, величина сопротивления при скольжении  $s=1$  несколько больше, чем при скольжении, приближающемся к  $s=0$ . Как это следует из рис. 2, сопротивление нулевой последовательности также зависит от величины тока нулевой последовательности, т. е. от насыщения.

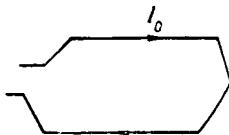
Естественно, что зависимость сопротивления нулевой последовательности от скольжения может быть объяснена лишь наличием магнитного потока, взаимодействующего с ротором, что подтверждают советские исследования [Л. 2, 3].

В табл. 1 приведены данные об испытанных двигателях и величины сопротивления нулевой последовательности при трех значениях скольжения. Из табл. 1 следует, что значение сопротивления нулевой последовательности может колебаться в значительных пределах. Это подтверждают имеющиеся в литературе указания, что сопротивление зависит от типа обмотки и от укорочения шага. Однако, как уже отмечалось, до сих пор не было строгих соотношений, которые позволили бы вычислить значения нулевой последовательности при известных параметрах обмоток.

Применение метода симметричных составляющих позволяет вывести обобщенные соотношения для определения величины сопротивления  $Z_0$ .

Рассмотрим пульсирующее магнитное поле, создаваемое при протекании токов нулевой последовательности по трехфазной обмотке (рис. 1). Как уже указывалось, число полюсов пульсирующего поля при этом равно  $(3 \cdot 2 p)$ . Известно, что пульсирующий магнитный поток может быть представлен как сумма двух потоков, вращающихся в противоположные стороны с одинаковой скоростью. В рассматриваемом случае скорость вращающихся полей будет в 3 раза меньше синхронной скорости двигателя. По своей физической природе эти вращающиеся потоки являются соответственно потоками прямой и обратной последовательности третьей пространственной гармоники потока. Поэтому сопротивление нулевой последовательности двигателя принципиально может быть представлено как некоторая функция сопротивлений прямой и обратной последовательности с учетом скорости вращающихся полей. Ука-

Рис. 3. Схематическая картина протекания тока нулевой последовательности в частях фазной обмотки.



занное обстоятельство позволяет предложить новый метод анализа сопротивления нулевой последовательности, вытекающий из общих соотношений метода симметричных составляющих.

Учитывая, что распределение магнитного потока в воздушном зазоре определяется направлением тока в активных частях обмоток, а порядок соединения лобовых частей существенной роли не играет, условно будем считать соединенными между собой соседние части обмоток, приходящиеся на одну пару полюсов (рис. 1). В общем случае магнитный поток, замыкающийся через одну пару полюсов, создается обмоткой, составляющей  $\frac{1}{p}$  часть фазной обмотки двигателя.

Схематически этот поток можно представить как поток, образуемый током, протекающим в двух проводниках (рис. 3). Эта картина аналогична получающейся при протекании тока по двум фазам трехфазной обмотки, третья фаза которой оборвана. Таким образом, части фазной обмотки, образующие поток нулевой последовательности, можно рассматривать, как две фазы симметричной трехфазной обмотки при условии, что ток в третьей фазе равен нулю, и к такой схеме могут быть применены основные соотношения для однофазного двигателя, рассматриваемого как частный случай трехфазного двигателя при обрыве одной из его фаз.

В последующем выводе под фазными величинами понимаются значения, относящиеся к частям фазных обмоток двигателя. При этом, как уже указывалось, рассматриваются две части фазных обмоток, приходящиеся на одну пару полюсов, и третья часть — фиктивная, ток в которой отсутствует.

Напишем основные соотношения для полученной системы:

$$I_a = 0; \quad I_b = -I_c; \quad (1)$$

здесь индексы  $b$  и  $c$  относятся к частям фазной обмотки, обтекаемым током.

Таблица 1

Сопротивление нулевой последовательности для различных значений скольжения двигателей

Р, квт	Тип обмотки	k <sub>y</sub>	Сопротивление Z <sub>0</sub> в относительных единицах при:			I <sub>0</sub> /I <sub>H</sub>
			s = 0	s = 0,667	s = 1	
0,25	Двухслойный	0,966	0,159 $\angle 41^{\circ}50'$	0,19 $\angle 46^{\circ}$	0,165 $\angle 37^{\circ}$	1
1,5		1	0,208 $\angle 64^{\circ}10'$	0,32 $\angle 68^{\circ}50'$	0,215 $\angle 67^{\circ}$	0,62
4,4		1	0,25 $\angle 59^{\circ}40'$	0,332 $\angle 69^{\circ}50'$	0,263 $\angle 43^{\circ}$	0,46
6,0		0,94	0,072 $\angle 39^{\circ}30'$	0,150 $\angle 55^{\circ}31'$	0,075 $\angle 32^{\circ}$	0,71
4,5	Однослоиный	1	0,128 $\angle 72^{\circ}20'$	*0,334 $\angle 79^{\circ}40'$	0,145 $\angle 69^{\circ}50'$	*0,735
0,6	Однослоиный	1	0,25 $\angle 63^{\circ}10'$	0,292 $\angle 65^{\circ}20'$	0,270 $\angle 58^{\circ}40'$	1,25

$$* \frac{I_0}{I_H} = 0,32.$$

Из выражений (1) непосредственно следует:

$$I_0^{(3)} = 0; I_1^{(3)} = -I_{11}^{(3)} = \frac{I_b}{a^2 - a} = \frac{I_c}{a - a^2}, \quad (2)$$

где  $I_0^{(3)}$ ,  $I_1^{(3)}$  и  $I_{11}^{(3)}$  — новые симметричные составляющие токов нулевой последовательности при примененном нами разложении.

Обозначив  $Z_1^{(3)}$  и  $Z_{11}^{(3)}$  — полные фазные сопротивления прямой и обратной последовательности для рассматриваемых условий, получим следующие выражения для напряжений отдельных частей фазных обмоток, приходящихся на рассматриваемую пару полюсов:

$$\dot{U}_b = \frac{1}{2p} I_1^{(3)} (a^2 Z_1^{(3)} - a Z_{11}^{(3)}),$$

$$\dot{U}_c = \frac{1}{2p} I_1^{(3)} (a Z_1^{(3)} - a^2 Z_{11}^{(3)}).$$

Полное напряжение фазы

$$\dot{U} = p(\dot{U}_b - \dot{U}_c) = \frac{1}{2} I_1^{(3)} (a^2 - a) (Z_1^{(3)} + Z_{11}^{(3)}). \quad (3)$$

С другой стороны, напряжение фазы в данном случае равно падению напряжения в сопротивлении нулевой последовательности от полного тока, являющегося током нулевой последовательности:

$$U = I_0^{(3)} Z_0 = I_b Z_0 = (a^2 - a) I_1^{(3)} Z_0. \quad (4)$$

Из двух последних уравнений получим, что

$$Z_0 = \frac{Z_1^{(3)} + Z_{11}^{(3)}}{2}. \quad (5)$$

Выражение (5) является основным соотношением, определяющим сопротивление нулевой последовательности трехфазного асинхронного двигателя.

Отметим, что выражение (5) может быть получено из непосредственного рассмотрения схемы „открытый треугольник“. Токи нулевой последовательности, протекающие в фазах двигателя, совпадают по величине и по фазе, поэтому поток нулевой последовательности можно рассматривать как поток, создаваемый током, протекающим в трех последовательно соединенных фазных обмотках (рис. 4, а). Преобразуем схему, отнеся две половины средней фазы к крайним фазам и образовав между полученными новыми обмотками с равным сопротивлением новую точку соединения  $O$  (рис. 4, б). Полученные таким образом новые обмотки можно рассматривать как две фазы симметричной трехфазной системы при условии, что ток в третьей фазе, показанной пунктиром, равен нулю. Число витков и сопротивление каждой фазы новой

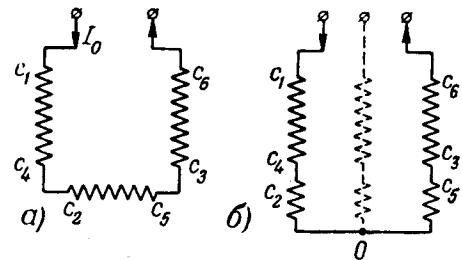


Рис. 4. Схема „открытый треугольник“ и ее преобразование.

системы в 1,5 раза превышает соответствующие значения фазы двигателя. По аналогии с написанными выше выражениями получим:

$$\dot{U}_b = I_1^{(3)} \left( \frac{3}{2} a^2 Z_1^{(3)} - \frac{3}{2} a Z_{11}^{(3)} \right),$$

$$\dot{U}_c = I_1^{(3)} \left( \frac{3}{2} a Z_1^{(3)} - \frac{3}{2} a^2 Z_{11}^{(3)} \right).$$

Полное напряжение, приложенное к трем последовательно соединенным фазным обмоткам,

$$\dot{U} = \dot{U}_b - \dot{U}_c = \frac{3}{2} I_1^{(3)} (a^2 - a) (Z_1^{(3)} + Z_{11}^{(3)}). \quad (3')$$

Приравнивая выражение (3') полному падению напряжения от тока нулевой последовательности в трех последовательно соединенных фазных обмотках, получим выражение (5).

Выражение (5) совершенно естественно объясняет зависимость величины сопротивления нулевой последовательности от скольжения и от насыщения и образование вращающего момента от токов нулевой последовательности, так как входящие в это выражение величины  $Z_1^{(3)}$  и  $Z_{11}^{(3)}$  по своей физической природе зависят от скольжения и от насыщения.

При анализе ряда пусковых схем, во избежание заметных погрешностей, следует учитывать зависимость сопротивления нулевой последовательности от скольжения. Кроме того, интерес представляет и определение величины сопротивления  $Z_0$  по известным параметрам двигателя. Для этих целей может быть использовано выражение (5), с помощью которого можно определить и величину вращающего момента, создаваемого токами нулевой последовательности.

При пользовании выражением (5) для вычисления величины сопротивления  $Z_0$  следует учитывать, что сопротивления  $Z_1^{(3)}$  и  $Z_{11}^{(3)}$  являются сопротивлениями прямой и обратной последовательностей, соответствующими третьей пространственной гармонической магнитного потока двигателя<sup>1</sup>. Поэтому сопротивления  $Z_1^{(3)}$  и  $Z_{11}^{(3)}$  могут определяться по соответствующим схемам замещения (рис. 5).

Рассмотрим отдельные величины, входящие в эти схемы замещения, для случая короткозамкнутого двигателя.

<sup>1</sup> Пренебрегаем гармониками более высоких порядков, кратных третем.

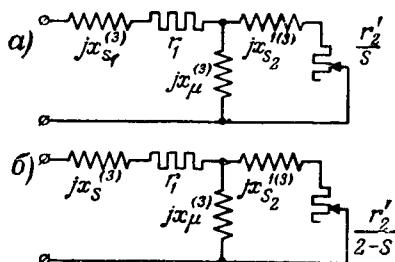


Рис. 5. Схемы замещения двигателя для третьей пространственной гармонической.

Активное сопротивление статорной обмотки  $r_1$  в этих схемах замещения можно принять равным активному сопротивлению обмотки статора. Пренебрегая влиянием изменения частоты на активное сопротивление ротора, принимаем и его равным активному сопротивлению для токов, индуцированных основной гармоникой магнитного потока. Таким образом, для определения значений  $Z_1^{(3)}$  и  $Z_{II}^{(3)}$  необходимо знание индуктивных сопротивлений рассеяния статора  $x_{s1}^{(3)}$  и ротора  $x_{s2}^{(3)}$  и сопротивления взаимоиндукции или намагничивания  $x_{\mu}^{(3)}$  для третьей пространственной гармоники магнитного потока. Если пренебречь магнитным сопротивлением стали, то получим, что значения коэффициентов магнитных проводимостей  $\lambda_n$  и  $\lambda_s$  пазового и лобового рассеяния для третьей пространственной гармоники потока не отличаются от соответствующих значений для основной гармоники. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния в воздушном зазоре  $\lambda_k$  для третьей гармонической изменится. Значение этого коэффициента может быть подсчитано по формуле (6), видоизмененной применительно к порядку гармоники [Л. 3]:

$$\lambda_k = \frac{t_1 k_{w(3)}^2}{11,98}, \quad (6)$$

где  $t_1$  — шаг зубца статора;

$k_{w(3)}$  — обмоточный коэффициент для третьей гармоники;

$\delta'$  — теоретический воздушный зазор.

Индуктивное сопротивление рассеяния статора

$$x_{s1}^{(3)} = x_{n1}^{(3)} + x_{s1}^{(3)} + x_{k1}^{(3)}, \quad (7)$$

где  $x_{n1}^{(3)}$ ,  $x_{s1}^{(3)}$ ,  $x_{k1}^{(3)}$  — соответствующие составляющие сопротивления рассеяния.

При вычислении отдельных составляющих индуктивного сопротивления рассеяния статора

следует учитывать изменение числа полюсов для третьей гармоники.

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции статорной обмотки для третьей гармоники потока может быть вычислено по формуле [Л. 4]

$$x_{\mu}^{(3)} = \frac{1}{9} x_{\mu}^{(1)} \left( \frac{k_{w(3)}}{k_{w(1)}} \right)^2, \quad (8)$$

где  $x_{\mu}^{(1)}$  — сопротивление взаимоиндукции или намагничивания основной гармоники;  $k_{w(1)}$  — обмоточный коэффициент для основной гармоники.

Сопротивление  $x_{\mu}^{(1)}$  может быть определено по данным опыта холостого хода двигателя в трехфазном режиме.

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, соответствующее третьей гармонике потока, может быть определено из выражения [Л. 4]

$$\frac{x_{\mu}^{(3)} + x_{s2}^{(3)}}{x_{\mu}^{(3)}} = \frac{1}{k_r^{(3)} k_c^{(3)}}, \quad (9)$$

где  $x_{s2}^{(3)}$  — индуктивное сопротивление рассеяния ротора для третьей гармоники;

$$k_r^{(3)} = \frac{\sin \left( \frac{3\pi p}{z_2} \right)}{3\pi p} ; \quad k_c^{(3)} = \frac{\sin \left( \frac{3\pi p}{z_2} \frac{b}{t_2} \right)}{3\pi p \frac{b}{t_2}},$$

$z_2$  — число пазов ротора;

$t_2$  — относительный скос паза в долях зубцового шага ротора.

Укажем, наконец, что значение скольжения в схемах замещения на рис. 5 должно соответствовать изменившемуся числу полюсов.

С помощью описанного метода были определены значения  $Z_1^{(3)}$  и  $Z_{II}^{(3)}$ , а также зависимость сопротивления нулевой последовательности от скольжения для двигателя АЛ-314 мощностью 0,6 квт. Основные параметры двигателя приведены в табл. 2. Обмотка статора — однослойная.

Определив индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора для третьей пространственной гармоники, по формуле (7) будем иметь:

$$x_{s1}^{(3)} = 24,4 \text{ ом.}$$

Подставив в формулу (8) численные значения  $k_{w(1)}$ ,  $k_{w(3)}$  и  $x_{\mu}^{(1)}$  из табл. 2, получим  $x_{\mu}^{(3)} = 16 \text{ ом}$ . Тогда, согласно выражению (9), индук-

таблица 2

Данные двигатели АЛ-31/4

D, мм	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	w <sub>1</sub>	Опытные данные		r <sub>2</sub> , ом	k <sub>w1</sub>	k <sub>w3</sub>	k <sub>y</sub>	k <sub>c3</sub>	δ', мм	λ <sub>n</sub>	λ <sub>s</sub>	λ <sub>k</sub>
				r <sub>1</sub> , ом	x <sub>μ</sub> <sup>(1)</sup> , ом									
89	24	18	472	12,4	270	7,5	0,966	0,707	1	0,83	0,26	1,38	1,52	2,49

тивное сопротивление рассеяния ротора для третьей гармоники

$$x'_{s2} = \frac{x_{\mu}^{(3)} (1 - k_{r(3)}^2 k_{c(3)}^2)}{k_{r(3)}^2 k_{c(3)}^2} = 17,7 \text{ ом.}$$

Определив параметры схемы замещения для третьей пространственной гармоники, найдем зависимость от скольжения величин  $Z_1^{(3)}$ ,  $Z_{II}^{(3)}$  и сопротивления нулевой последовательности  $Z_0$ .

Вычислим значения  $Z_1^{(3)}$ ,  $Z_{II}^{(3)}$  и  $Z_0$  для скольжения  $s = 0,667$ , соответствующего  $1/3$  синхронной скорости двигателя. При этом скольжение для третьей гармоники равно нулю, а сопротивление нулевой последовательности имеет максимальное значение.

Имеем:

$$Z_1^{(3)} = r_1 + j(x_{s1}^{(3)} + x_{\mu}^{(3)}) = 12,4 + j40,4 \text{ ом,}$$

$$Z_{II}^{(3)} = r_1 + jx_{s1}^{(3)} + \frac{\left(\frac{r_2'}{2} + jx_{s2}^{(3)}\right) jx_{\mu}^{(3)}}{\frac{r_2'}{2} + j(x_{s2}^{(3)} + x_{\mu}^{(3)})} = \\ = 13,2 + j32,9 \text{ ом,}$$

тогда

$$Z_0 = \frac{Z_1^{(3)} + Z_{II}^{(3)}}{2} = 12,8 + j36,2.$$

Аналогично определяем значения  $Z_1^{(3)}$ ,  $Z_{II}^{(3)}$  и  $Z_0$  при других значениях скольжения.

На рис. 6 сравниваются значения составляющих  $r_0$  и  $x_0$  сопротивления нулевой последовательности  $Z_0$ , вычисленные указанным способом и полученные из опыта. Как следует из рис. 6, опытные и расчетные данные совпадают достаточно хорошо. Максимальная ошибка при расчете меньше 10%.

Как уже отмечалось, выражение (5) может быть использовано и для определения врачающего момента, создаваемого токами нулевой последовательности.

На основе полной схемы замещения сопротивления нулевой последовательности может быть разработан ряд упрощенных схем замещения, применение которых упростит вычисление сопротивления  $Z_0$ .

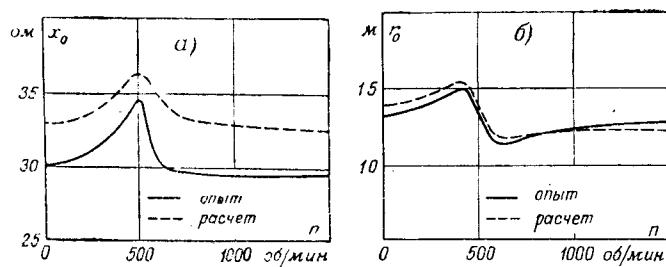


Рис. 6. Сравнение расчетных и опытных данных для сопротивления нулевой последовательности.

Как уже указывалось, величина сопротивления нулевой последовательности зависит от насыщения. Эта зависимость сильнее сказывается в асинхронных машинах, где более заметна и зависимость сопротивления нулевой последовательности от скольжения. Однако высказанные выше соображения о физической природе сопротивления  $Z_0$  полностью справедливы и для трехфазных синхронных машин, и выражение (5) принципиально может быть использовано для определения сопротивления нулевой последовательности этих машин. Очевидно благодаря укорочению шага, обычно применяемому в синхронных машинах, а также большему воздушному зазору, зависимость сопротивления нулевой последовательности от насыщения и скольжения сказывается в них менее заметно.

Работа выполнена по предложению доктора техн. наук, проф. Л. Е. Эбина и при участии инж. М. Т. Жулина.

#### Литература

1. К. Вагнер и Р. Эванс. Метод симметричных составляющих. ОНТИ, 1936.
2. И. М. Камень. Работа асинхронного двигателя при несимметричных схемах и сопротивление нулевой последовательности. Электричество, № 10, 1949.
3. Ю. С. Чечет. Влияние третьей пространственной гармоники магнитного потока на пусковые свойства трехфазного асинхронного двигателя, работающего от сети однофазного тока. Электричество, № 3, 1950.
4. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть. Госэнергоиздат, 1949.

[16. 5. 1952]



# Измерение температур диэлектриков и полупроводников в полях высокой частоты

Кандидат техн. наук, доц. А. В. НЕТУШИЛ и инж. А. А. ЛИСЕНКОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Измерение температуры материала при высокочастотном нагреве представляет собой важную задачу, без решения которой невозможно правильно управлять технологическим процессом.

Применение ртутных термометров, расположаемых перпендикулярно линиям электрического поля, до настоящего времени является единственным хорошо зарекомендовавшим себя методом. Однако большие размеры термометров и невозможность дистанционного отсчета показаний часто делают применение ртутных термометров затруднительным.

Широко применяемые при других способах нагрева термопары и термометры сопротивления при высокочастотном нагреве в ряде случаев приводят к большим искажениям электрических и тепловых полей, перегреву прилегающих к термопаре слоев и большим погрешностям измерений.

Задачей настоящей работы является: рассмотреть особенности измерения температуры в полях высокой частоты с помощью термопар и дать практические рекомендации для правильного применения этого метода измерения температуры, более совершенного, чем ртутными термометрами.

Расчеты распределения в материале подведенной мощности, выполненные в соответствии с [Л. 1], показывают, что значительные изменения удельных мощностей вблизи термопары могут быть вызваны только изменением потенциала термопары вследствие емкостных токов.

Расчеты распределения температуры, проведенные для частот, при которых электрическое поле можно считать потенциальным [Л. 1], показывают, что наибольшее изменение температуры термопары  $\Delta\theta$  зависит в первую очередь от изме-

рения потенциала термопары  $\Delta\varphi$ :

$$\Delta\theta = \frac{(\Delta\varphi)^2\gamma}{2\lambda}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — удельная активная проводимость материала в параллельной схеме замещения, а  $\lambda$  — его теплопроводность. Так как  $\gamma$  обычно растет с частотой, то чем выше частота, тем больше искажение в показании термопары. Для того чтобы искажение было минимальным, необходимо так располагать провода термопары, чтобы  $\Delta\varphi$  довести до нуля. Для расчета величины  $\Delta\varphi$  рассмотрим некоторые случаи установки измерительных термопар.

На рис. 1, а схематически показан материал в поле конденсатора колебательного контура, средняя точка которого заземлена. На потенциалах пластин конденсатора  $\varphi_1 = -\varphi_2$  не оказывается внесение термопары. Термопара вводится в участок материала с потенциалом  $\varphi_0$ . При внесении термопары потенциал слоев, примыкающих к термопаре, изменяется на величину  $\Delta\varphi$ . Зная  $\varphi_0$  и частичные емкости цепи термопары, легко рассчитать величину  $\Delta\varphi$ .

Участок цепи термопары, утопленный в материале, можно представить в виде некоторого двухполюсника с э. д. с., равной  $\varphi_0$ , внутренней емкостью  $C_b = C_1 + C_2$  (рис. 1, б), нагруженного на емкость внешних проводов  $C_3$ .

Тогда

$$\Delta\varphi = \varphi_0 \frac{C_3}{C_3 + C_b}. \quad (2)$$

Для того чтобы  $\Delta\varphi$  было минимальным, необходимо либо устанавливать термопару в местах с потенциалом земли ( $\varphi_0 = 0$ ), либо обеспечить условие  $C_3 \ll C_b$ .

На рис. 2, а показан второй случай, для которого термопара установлена в точке с потенциалом  $\varphi_0 = 0$ , однако за счет несимметрии вывода относительно пластин конденсатора возможны искажения поля. Схема замещения для этого случая показана на рис. 2, б. Как видно из рисунка, величина  $\Delta\varphi$  может быть подсчитана следующим образом:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 \frac{C_4}{C_4 + C_a}, \quad (3)$$

и будет тем больше, чем большее емкость несимметрии  $C_a$ .

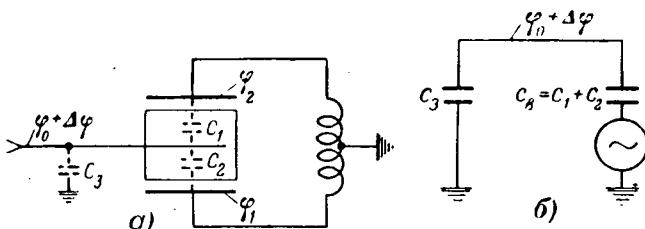


Рис. 1. Схема установки термопары (I вариант).  
а — принципиальная схема; б — схема замещения.

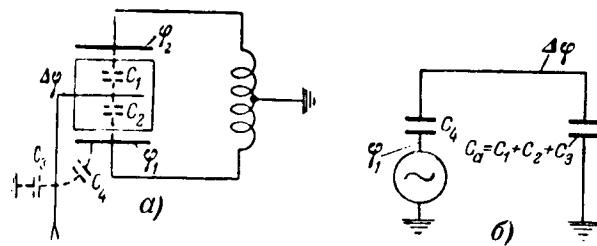


Рис. 2. Схема установки термопары (II вариант).  
а—принципиальная схема; б—схема замещения.

Исходя из приведенных положений, можно сделать вывод о целесообразности применения термопары с достаточно малой длиной внешней цепи, и так расположенной, чтобы емкости  $C_3$  и  $C_4$  были минимальными.

Для экспериментальной проверки этого вывода были изготовлены медь-константановые термопары длиной 40...45 мм из изолированной проволоки диаметром 0,3 мм. Термопары вставлялись в деревянный бруск (сосна) на глубину 30 мм в предварительно проделанные иглой отверстия. Выступающие на 10...15 мм концы термопары использовались для подключения к ним проводов, входящих в общую схему измерения (рис. 3). Само подключение осуществлялось с помощью специально сконструированного приспособления, которое может быть названо ртутным контактором. Корпус его, изготовленный из изоляционного материала, имеет два углубления, заполненных ртутью. Для предотвращения испарения ртути поверх нее может быть налит слой масла или воды. В одно углубление опущен конец провода из константана, идущего к холодному спаю; в другое — конец медного провода, идущего к гальванометру.

На время замеров температуры электрическое поле выключалось и выступающие концы термопары погружались в заполненные ртутью углубления контактора. Продолжительность одного замера определялась временем стабилизации показания гальванометра (зеркальный гальванометр ОПГ) и составляла в среднем 10...12 сек. Переключение контактора с одной термопары на другую при некотором навыке требует лишь 2...3 сек. Таким образом, замер температуры в 5...7 точках требует меньше чем 0,5 мин. Выключение электрического поля на этот срок практически не оказывало заметного влияния на процесс нагрева при замерах через каждые 10...15 мин.

Отсутствие заметного искажения температурного поля было установлено путем сравнения показаний термопары с показаниями ртутного термометра, установленного на одной вертикали с термопарой на возможно близком расстоянии от нее—5 мм. Построенные по показаниям термопары и термометра температурные кривые нагрева 1 и 2 (рис. 4) свидетельствуют о том, что расхождения не выходят за пределы точности показаний каждого из этих приборов.

Влияние длины термопары на ее показания видно из кривых 3 и 4 (рис. 4). Кривая 3 соответствует термопаре длиной 85 мм, кривая 4—220 мм. Из рассмотрения этих кривых следует,

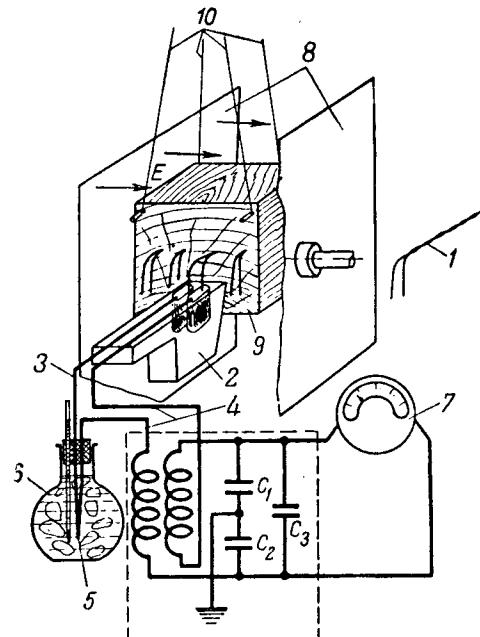


Рис. 3. Принципиальная схема измерений температуры с помощью коротких термопар.  
1—термопара; 2—ртутный контактор; 3—провод из константана; 4—медные провода; 5—холодный спай; 6—сосуд Дюара; 7—гальванометр; 8—пластины рабочего конденсатора; 9—образец из дерева; 10—нити для подвески образца.

Пунктирная рамка — защита гальванометра от токов высокой частоты.

что с увеличением длины показания увеличиваются. Еще большее повышение температуры материала вблизи термопары происходит в том случае, когда нагрев образца производится при подключенном к термопаре гальванометре (кривая 5). В этом случае превышение показаний тер-

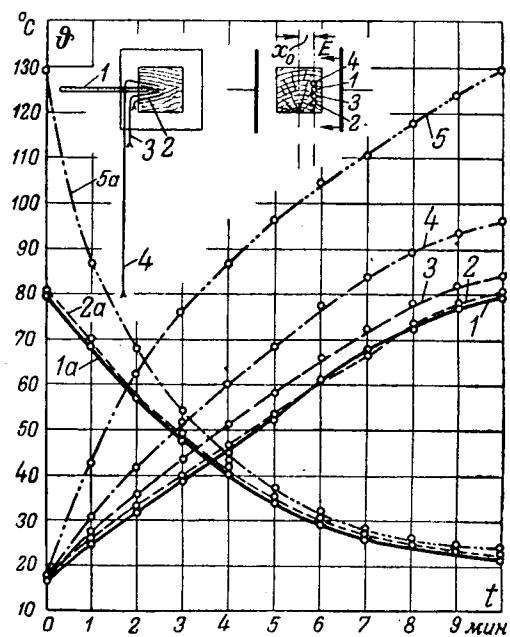


Рис. 4. Температурные кривые нагрева и охлаждения образца с термопарами различной длины.

1—ртутный термометр; 2—термопара длиной  $l=45$  мм;  
3—термопара  $l=85$  мм; 4—термопара  $l=220$  мм;  
5—термопара, постоянно подключенная к гальванометру.

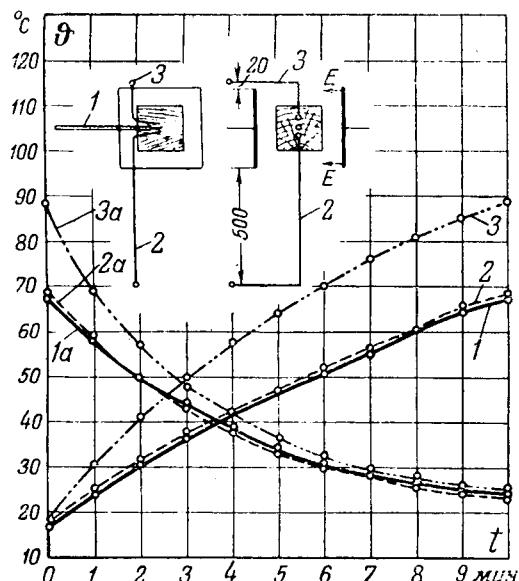


Рис. 5. Температурные кривые нагрева и охлаждения образца с термопарами, установленными в нейтральной плоскости.  
1—рутинный термометр; 2—термопара с отходящими проводами, удаленными от рабочих пластин на расстояние  $l = 20$  мм; 3—то же при  $l = 500$  мм.

мопары по сравнению с термометром достигает  $50^\circ\text{C}$  к концу нагрева. Величину того же порядка дает и расчет по формуле (1). При  $C_3 \geq C_2$  получаем  $\Delta\varphi = \varphi_0$ , а при  $x_0 = 2$  см и  $E = 300$  в/см, что имело место в рассматриваемом случае  $\Delta\varphi = 600$  в. Для этого случая при

$$\lambda = 0,002 \text{ квт/см}^\circ\text{C}, f = 13,66 \text{ мгц}, \gamma = 10^{-6} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$$

наибольшая ошибка в измерении температуры составляет  $\Delta\theta = 60^\circ\text{C}$ .

Повышение температуры материала вблизи термопары, не отключавшейся от гальванометра при нагреве, происходило, очевидно, в достаточно малом объеме. При охлаждении образца это тепло быстро поглощалось соседними менее нагретыми слоями, и температура вблизи термопары резко падала. По мере понижения этой температуры скорость охлаждения соприкасающихся с термопарой слоев постепенно приближалась к скорости охлаждения образца в соседних точках, где были установлены короткая термопара (кривая 2a) и рутинный термометр (кривая 1a).

Для возможности высокочастотного нагрева образца при подключенном к термопаре гальванометре прибор имел защиту от токов высокой частоты (рис. 3), принципиально не отличающуюся от обычных способов защиты измерительных приборов в радиоустановках.

Температура образца в точках, расположенных в нейтральной плоскости поля ( $x_0 = 0, \Delta\varphi = 0$ ), измерялась без заметных искажений при нагреве с подключенной к гальванометру термопарой. Кривые нагрева и охлаждения указывают на такое же совпадение показаний термопары (кривые 2 и 2a, рис. 5) и рутинного термометра (кривые 1 и 1a), как при нагреве с короткой, отключаемой при нагреве термопарой. Однако обязательным условием в этом случае является расположение отходящих от термопары проводов в нейтральной плоскости на достаточно большом удалении от пластин рабочего конденсатора ( $C_4 \ll C_0$ ).

В наших опытах провода проходили в нейтральной плоскости на протяжении 0,5 м (рис. 5). При нарушении этого условия наблюдались искажения температурного поля. Кривая 3 (рис. 5) соответствует показаниям термопары, провода которой отстоят от края пластины конденсатора на 20 мм. Сопоставление этой кривой с кривой 1 (для рутинного термометра) приводит к выводу о наличии искажения температурного поля вблизи рассматриваемой термопары. Характер кривой охлаждения по показаниям этой термопары (кривая 3a) также говорит о наличии местного нагрева.

**Выводы.** 1. Искажение температурного поля при высокочастотном нагреве вблизи термопары происходит за счет изменения электрического поля.

2. Изменение электрического поля, вызывающее искажение температурного поля, определяется в основном емкостными токами, величина которых зависит от внешней цепи термопары и места ее установки.

3. Теоретически и экспериментально показана целесообразность применения для измерения температуры при высокочастотном нагреве диэлектриков и полупроводников коротких термопар, обеспечивающих незначительное искажение температурного поля и, следовательно, удовлетворительную точность измерения при подключении гальванометра на момент измерения.

4. Вопрос непрерывного измерения температуры успешно решается при установке термопары в местах, имеющих потенциал земли. Применение непрерывного измерения температуры в любых точках связано с разработкой специальных низкочастотных фильтров, устанавливаемых в местах вывода термопар из материала и сводящих емкостные токи к минимальной величине.

#### Литература

1. А. В. Нетушил. Некоторые задачи теории высокочастотного нагрева. Электричество, № 8, 1952.

[5, 9, 1952]



# О методике определения водопоглощаемости слоистых пластмасс<sup>1</sup>

Кандидат техн. наук И. И. ИВАНОВ  
МОНИТОЭ

Изучение результатов проведенного исследования влияния различных факторов (толщины, способа обработки образца, связующего и т. д.) на водопоглощаемость слоистых пластиков приводит к заключению о необходимости пересмотра существующих стандартов 4650-49 и 2718-50 в части методики определения этой характеристики.

**Влияние толщины образца и продолжительности его погружения в воду на водопоглощаемость.** Были взяты образцы гетинакса марки Б толщиной 1; 3; 10; 15 и 20 мм, изготовленные на смоле БФ, и образцы текстолита той же марки толщиной 0,5; 1 и 2 мм. Размер образцов 120×15 мм. Методика испытаний: образцы предварительно высушивались в термостате при  $t=+105^{\circ}\text{C}$  до состояния постоянного веса, а затем охлаждались в эксикаторе с хлористым кальцием.

После этого производилось их взвешивание с точностью до 1 мг, а затем они подвешивались в сосуде с дистиллированной водой. По истечении 1, 3, 5 и т. д. суток образцы вынимались из воды, каждый раз по одному, влага с их поверхности удалялась с помощью фильтровальной бумаги и они тотчас взвешивались. В результате была выявлена зависимость водопоглощаемости от продолжительности нахождения образца в воде. В табл. 1 даны для гетинакса марки Б средние значения полученных величин.

На основании экспериментальных данных критикуется методика определения водопоглощаемости слоистых пластиков по стандартам 4650-49 и 2718-50. Указывается на заниженность показателей этой характеристики для гетинакса. Вносятся предложения по пересмотру стандартов.

Приведенные в табл. 1 цифры показывают, что после первых суток нахождения в воде водопоглощаемость образцов различной толщины почти вдвое меньше, чем это допускает ГОСТ 2718-50.

После трехсуточной выдержки в воде водопоглощаемость резко возросла у пластинок толщиной 10 мм и выше. Например, при толщине 20 мм эта величина возросла почти в 10 раз, по отношению к измеренной после суточной выдержки. У образцов в 1 и 3 мм такого резкого повышения водопоглощаемости не наблюдалось. Следовательно, водопоглощаемость данных образцов после трехсуточной выдержки в воде уже в значительной мере стала зависеть от толщины пластиинки, имея в виду постоянство остальных размеров.

Полученная закономерность была проверена и на образцах текстолита марки Б для небольших толщин 0,5; 1 и 2 мм (табл. 2).

Из сравнения табл. 1 и 2 видно, что водопоглощаемость гетинакса больше, чем текстолита.

Влияние толщины образца на водопоглощаемость при слоистой структуре материала и более ускоренное насыщение водой образцов из текстолита позволяют предполагать, что засасывание влаги в толщу образца в значительной мере осуществляется через его торцевые поверхности, что подтверждается следующим опытом.

Таблица 1

Толщина материала, мм	Водопоглощаемость (г/дм <sup>2</sup> ) образцов гетинакса марки Б, погруженных в воду, спустя:							
	Сутки	1	2	3	5	8	24	60
1	0,127	0,230	—	0,292	0,371	0,403	—	—
3	0,338	0,487	—	0,690	0,730	1,230	—	—
10	0,440	—	2,57	—	—	3,940	4,170	—
15	0,190	—	1,58	—	—	3,250	4,140	—
20	0,310	—	3,07	—	—	5,360	6,270	—

<sup>1</sup> В порядке предложения.

Таблица 2

Водопоглощаемость ( $g/dm^3$ ) образцов текстолита марки Б, погруженных в воду, спустя:

Толщина материала, мм	Сутки	1	2	4	5	8	15	36
		0,09	0,127	0,129	0,129	0,129	0,129	0,129
0,5								
1,0		0,129	0,176	0,183	0,199	0,204	0,205	0,206
2,0	—		0,351	0,392	0,411	0,443	0,443	0,520

Таблица 3

В одопоглощаемость ( $g/dm^2$ ) образцов, погруженных в воду, спустя:

Характеристика образца	Сутки	1	3	10
		0,26	0,55	1,08
Гетинакс марки С, $\delta=10$ мм, на смоле ОК с открытыми торцами . . . . .				
То же, но с торцевыми поверхностями, покрытыми парафином . . . . .	0,10	0,13	0,42	

В воду были заложены образцы гетинакса марки С, изготовленного на смоле ОК, размером  $50 \times 50$  мм и толщиной 10 мм. У половины образцов все торцевые поверхности были залиты парафином, а у другой половины оставлены открытыми. Как видно из табл. 3, водопоглощаемость образцов с торцами, покрытыми парафином, примерно в  $2\frac{1}{2}$  раза меньше, чем у образцов с торцами, открытыми для воды.

**Влияние обработки поверхности гетинакса.** Из гетинакса марки Б, изготовленного на смоле ОФ, были сделаны пластинки  $50 \times 50$  мм и толщиной

Таблица 4

Водопоглощаемость ( $g/dm^2$ ) образцов, погруженных в воду, спустя:

Характеристика образца	Сутки	1	3	10	90
		0,30	0,67	1,13	3,94
Гетинакс марки Б, $\delta=10$ мм, на смоле ОФ без обработки поверхности . . .					
То же, но с одной обработанной поверхностью . . .	0,31	0,68	1,30	6,00	

Водопоглощаемость ( $g/dm^2$ ) образцов гетинакса марки Б, погруженных в воду, спустя:

Связующая масса	Сутки	1	3	10	24	60
		БФ	2,58	—	3,94	4,17
ОФ	0,30	0,67	1,13	—	—	3,94
ОК	0,26	0,55	1,08	—	—	4,23
ББФ	0,21	0,31	0,70	1,62*	—	—

\* За 30 суток.

10 мм. У части образцов одна из больших поверхностей была профрезерована до общей толщины пластиинки 10 мм. Остальные образцы оставлены без обработки.

Результаты опыта, помещенные в табл. 4, показывают, что водопоглощаемость у образцов как с обработанной поверхностью, так и необработанной после выдержки в воде в течение 3 суток остается почти одинаковой.

**Влияние связующей смолы.** Образцы для этого опыта были сделаны из листового гетинакса Б размером  $50 \times 50 \times 10$  мм. Результаты измерений приведены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что наименьшую водопоглощаемость имели образцы, изготовленные на смоле ББФ, а наибольшую — образцы на смоле БФ. Это указывает, что смола БФ по водопоглощаемости менее пригодна как связующее вещество. Необходимо отметить, что это невозможно было бы обнаружить, если бы ограничились определением водопоглощаемости после 24-часовой вы-

Таблица 5

Удельное сопротивление ( $om \cdot cm$ ) образцов, погруженных в воду, спустя:

Материал	Сутки	0	1	3	10	30	Испытательное напряжение, в
		1,07 · 10 <sup>11</sup>	2,58 · 10 <sup>9</sup>	1,2 · 10 <sup>9</sup>	2,0 · 10 <sup>8</sup>	5,3 · 10 <sup>7</sup>	
Гетинакс Б на смоле ОФ . . . . .							
Гетинакс С на смоле ОК . . . . .		1,25 · 10 <sup>11</sup>	1,07 · 10 <sup>10</sup>	2,06 · 10 <sup>9</sup>	6,1 · 10 <sup>8</sup>	—	1 000
Гетинакс Б на смоле ББФ . . . . .		1,47 · 10 <sup>11</sup>	1,27 · 10 <sup>11</sup>	5,7 · 10 <sup>9</sup>	8,1 · 10 <sup>8</sup>	—	1 000

держки образцов в воде, как это рекомендуется ГОСТ 4650-49.

**Водопоглощаемость и удельное электрическое сопротивление.** Эта зависимость проверялась на тех же образцах, непосредственно после измерений водопоглощаемости в зависимости от продолжительности погружения материала в воду.

Результаты измерений приведены в табл. 6.

По данным табл. 6 наибольшее удельное сопротивление имеют образцы гетинакса на смоле ББФ, а наименьшее — изготовленные на смоле ОФ, что и соответствует данным табл. 5.

**Выводы.** 1. Слоистые пластики — гетинакс и текстолит — поглощают влагу наиболее интенсивно с торцевых поверхностей.

2. Вследствие неравнозначности боковой и торцевой поверхностей суммарная величина поглощения влаги, отнесенная к единице общей поверхности, у толстых образцов всегда больше, чем у тонких, что подтверждается опытом (табл. 3).

3. При определении водопоглощаемости гетинакса и текстолита необходимо учитывать процентное отношение суммы торцевых поверхностей к полной; следовательно, методика определения водопоглощаемости для этих материалов, реко-

мендуемая ГОСТ 4650-49, должна быть соответственно изменена.

4. Показатели водопоглощаемости за одни сутки выдержки образца в воде, предложенные ГОСТ 2718-50, завышены и должны быть уточнены.

5. Состав связующего вещества отражается на величине водопоглощаемости и наиболее значительно после трехсуточной выдержки образца в воде.

6. Комплексное изучение вопроса о водопоглощаемости, являясь предметом специально научно-исследовательской работы, должно быть поставлено на разрешение в ближайшее время.

Настоящее исследование проводилось в лаборатории МЭИ. В эксперименте принимали участие студенты этого института тт. Микшес и Чаясская.

#### Литература

1. М. М. Михайлов и Т. Н. Дьяченко. Влагопоглощение малополярных органических электроизоляционных материалов. Электричество, № 8, 1947.

2. Н. П. Богоядицкий, В. В. Пасынков и Б. М. Тареев. Электротехнические материалы. Госэнергиздат, 1950.

[13. 8. 1952]



# Синтез некоторых нелинейных цепей<sup>1</sup>

Кандидат техн. наук С. А. ГИНЗБУРГ

Московский энергетический институт им. Молотова

**Характеристики нелинейного элемента.** Для решения вопросов синтеза необходимо ранее рассмотреть характеристики нелинейного элемента и возможности замены его эквивалентными величинами.

Ограничим рассмотрение нелинейными элементами с чистоактивным сопротивлением. В случае переменного тока будем считать, что нелинейный элемент достаточно инерционен и сопротивление его не изменяется в течение периода. Пусть вольтамперная характеристика  $U = f_1(I)$  нелинейного элемента представлена кривой рис. 1. Известно, что для любой точки этой кривой нелинейный элемент характеризуется двумя основными параметрами

$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U}{I} = r$  — статическое сопротивление,

$\operatorname{tg} \psi = \frac{dU}{dI} = \rho$  — динамическое сопротивление.

Весьма целесообразно ввести *относительный параметр*:

$$k_r = \frac{\rho}{r}. \quad (1)$$

$k_r$  можно назвать *относительным сопротивлением нелинейного элемента*. Для кривой рис. 1  $k_r < 1$ . Если поменять местами оси координат и рассматривать кривую  $I = f_2(U)$ , то получим:

$\operatorname{tg} \delta = \frac{I}{U} = g$  — статическая проводимость,

$\operatorname{tg} \sigma = \frac{dI}{dU} = \gamma$  — динамическая проводимость.

Отношение этих величин:

$$k_g = \frac{\gamma}{g}. \quad (2)$$

можно назвать *относительной проводимостью нелинейного элемента*. Для кривой рис. 1  $k_g > 1$ . Заметим, что для линейного элемента  $k_r = k_g = 1$ .

Для расчета нелинейной цепи удобно строить зависимость  $r$ ,  $\rho$  и  $k_r$ , или  $g$ ,  $\gamma$  и  $k_g$  от тока или напряжения нелинейного элемента. В качестве примера на рис. 2 показана вольтамперная характеристика бареттера 0,3 Б 17-35, а также зависимости  $r$ ,  $\rho$  и  $k_r$  от тока в бареттере.

<sup>1</sup> Работа должна была состояться в 1949 г. в НТО МЭИ и на научной сессии, посвященной Дню радио.

Рассматриваются вопросы синтеза нелинейной цепи: методы определения параметров линейных элементов цепи и возможных режимов цепи (токи, напряжения), удовлетворяющих заданным условиям работы и характеристикам нелинейных элементов. Вводятся понятия о функциональных и энергетических условиях работы цепи. Рассматриваются в общем виде функциональные условия индикатора и стабилизатора напряжения, а также релейной цепи (триггера). Показывается возможность выражения характеристик синтезированной нелинейной цепи в относительных единицах. Приведен числовой пример расчета мостового стабилизатора с бареттерами при помощи безразмерных формул.

**Замена нелинейного элемента.** Целесообразно применять два вида замены: 1) замена эквивалентным источником и 2) замена источником и динамическим параметром.

**Замена эквивалентным источником** применима в равной степени как к нелинейным, так и к линейным элементам. Таким источником может быть источник э. д. с. или источник тока. На рис. 3, а показана цепь, в ветви 1 которой включен нелинейный элемент. Цепь может содержать, вообще говоря, любое число внутренних источников, один из них показан на схеме а, выделенным в ветви  $A$ . Токи и напряжения в цепи не изменятся, если взамен нелинейного элемента

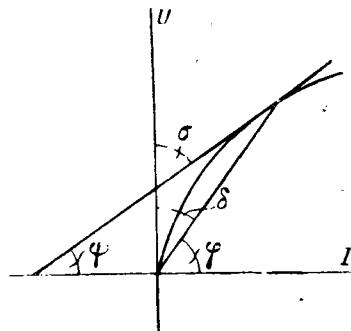


Рис. 1. Определение статических и динамических параметров нелинейного элемента

включить источник э. д. с., причем величина э. д. с. равна падению напряжения на нелинейном элементе с обратным знаком, а внутреннее сопротивление источника равно нулю (рис. 3, б). Тогда пользуясь принципом наложения токов, можем написать:

$$I_1 = U g_1 = I_{1\kappa} - U_1 g_{11\kappa}, \quad (3)$$

где  $I_1$  — ток в нелинейном элементе;

$I_{1\kappa}$  — ток короткого замыкания ветви 1;

$U_1$  — напряжение на нелинейном элементе;

$g_1$  — проводимость нелинейного элемента;

$g_{11\kappa}$  — собственная (входная) проводимость ветви 1.

Из уравнения (3) следует, что

$$U_1 = \frac{I_{1\kappa}}{g_1 + g_{11\kappa}}. \quad (4)$$

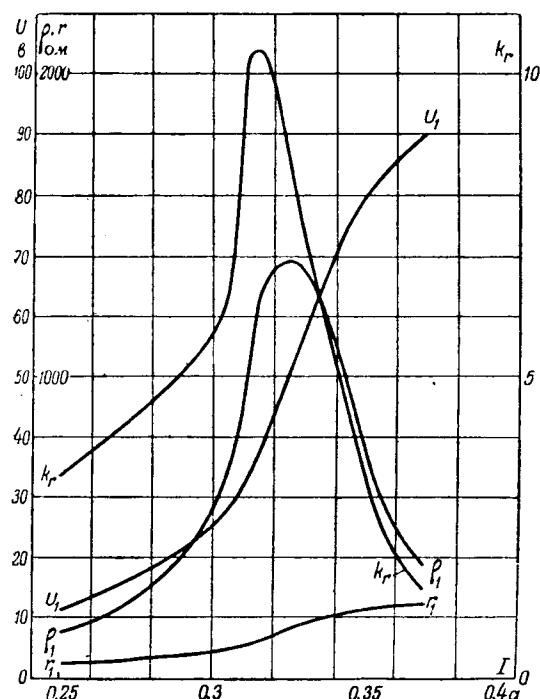


Рис. 2. Характеристика баристтера 03Б17-35. Зависимости напряжения  $U_1$ , статического  $r_1$ , динамического  $r_1$  и относительного  $k$ , сопротивлений от тока.

Ток в ветви  $B$  (рис. 3,б) определяется следующим образом:

$$I_B = I_{B\kappa} - U_1 g_{1B\kappa}, \quad (5)$$

где  $I_{B\kappa}$  — ток в ветви  $B$  при коротком замыкании ветви  $1$ ;

$g_{1B\kappa}$  — взаимная проводимость ветвей  $1$  и  $2$ .

Из уравнений (4) и (5) следует, что

$$I_B = I_{B\kappa} - \frac{I_{1\kappa} g_{1B\kappa}}{g_{11\kappa}}, \quad (6)$$

Формулы (4) и (6) аналогичны теореме вариации К. М. Поливанова [Л. 1].

Токи и напряжения в цепи рис. 3,а также не изменятся, если взамен нелинейного элемента включить источник тока, причем величина тока должна быть равна току в нелинейном элементе с обратным знаком, а внутренняя проводимость источника равна нулю (рис. 3,в). Пользуясь принципом наложения напряжений, можем написать:

$$U_1 = I_1 r_1 = U_{10} - I_1 r_{110}, \quad (7)$$

где  $U_{10}$  — напряжение холостого хода ветви  $1$ ;

$r_1$  — сопротивление нелинейного элемента;

$r_{110}$  — собственное (входное) сопротивление ветви  $1$ .

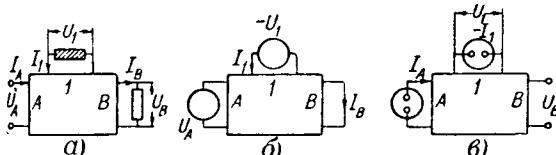


Рис. 3. Замена нелинейного элемента эквивалентным источником.

Из уравнения (7) следует:

$$I_1 = \frac{U_{10}}{r_1 + r_{110}}. \quad (8)$$

Напряжение ветви  $B$  (рис. 3,в) определяется следующим образом:

$$U_B = U_{B0} - I_1 r_{1B0}, \quad (9)$$

где  $U_{B0}$  — напряжение ветви  $B$  при холостом ходе ветви  $1$ ;

$r_{1B0}$  — взаимное сопротивление ветвей  $1$  и  $B$ .

Из уравнений (8) и (9) следует, что:

$$U_B = U_{B0} - \frac{U_{10} r_{1B0}}{r_1 + r_{110}}. \quad (10)$$

Формулы (8) и (10) представляют собой теорему Тевенена и ее распространение на случай, когда определяется напряжение другой ветви.

Для обоих случаев замены нелинейных элементов получается, как легко видеть, одинаковый характер построения формул. Исключение нелинейных элементов путем замены их эквивалентными источниками является весьма эффективным приемом, так как позволяет, как показал А. В. Нетушил [Л. 2] и автор [Л. 3], применять к нелинейным цепям принцип наложения.

**Замена источником и динамическим параметром.** Замена применима только к нелинейным элементам. Рассмотрим вольтамперную характеристику рис. 4,а. Касательная, проведенная к кривой в точке  $A$ , отсекает на оси напряжений отрезок  $e$ , а на оси токов отрезок  $i$ . Напряжение  $e$  и ток  $i$  нелинейного элемента, соответствующие точке  $A$ , могут быть выражены следующим образом:

$$U = Ir = I \operatorname{tg} \phi - e = I\rho - e, \quad (11)$$

$$I = Ug = U \operatorname{tg} \sigma + i = U_1 + i. \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) приводят к мысли о возможности замены нелинейного элемента эквивалентными цепями, состоящими из источника и динамического параметра. Согласно (11) эквивалентная цепь (рис. 4,б) представляет собой последовательное соединение источника э. д. с.  $e$  с внутренним сопротивлением, равным нулю, и сопротивления, равного динамическому сопротивлению  $\rho$  нелинейного элемента в точке  $A$ .

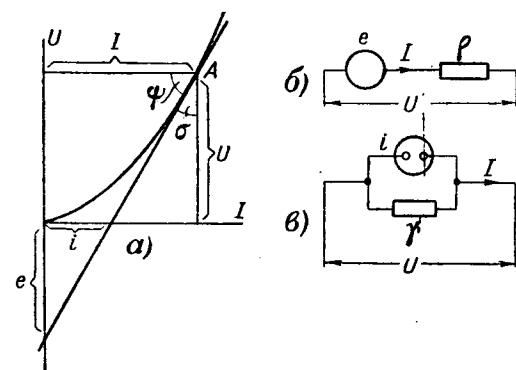


Рис. 4. Замена нелинейного элемента эквивалентной цепью.

Согласно (12) эквивалентная цепь (рис. 4 $\theta$ ) представляет собой параллельное соединение источника тока  $i$  с внутренней проводимостью, равной нулю, и проводимости, равной динамической проводимости  $\gamma$  нелинейного элемента в точке  $A$ . Величины  $e$  и  $i$  определяются из (11) и (12):

$$e = I(\rho - r), \quad (13)$$

$$i = U(g - \gamma). \quad (14)$$

Очевидно, что для линейного элемента  $e$  и  $i$  равны нулю.

Такую замену нелинейного элемента можно рассматривать, как линеаризацию его характеристики в окрестности точки  $A$ . Тогда в пределах бесконечно-малого участка кривой мы заменяем нелинейный элемент постоянным источником ( $e$  или  $i$ ) и "линейным" параметром ( $\rho$  или  $\gamma$ ). Такая линеаризация в малом, очевидно, позволяет пользоваться в малом принципом наложения.

Заметим, что отношения  $\frac{e}{U}$  и  $\frac{i}{I}$  выражаются через относительные сопротивления и проводимости нелинейных элементов следующим образом:

$$\frac{e}{U} = k_r - 1, \quad (15)$$

$$\frac{i}{I} = 1 - k_g. \quad (16)$$

Э. д. с.  $e$  и ток  $i$  связаны законом Ома через динамические параметры:

$$i = \frac{e}{\rho} = e\gamma. \quad (17)$$

**Метод синтеза.** Задача синтеза заключается в следующем. Задана характеристика нелинейного элемента, структура цепи и  $N$  условий работы цепи. Можно различить два вида заданных условий работы цепи: 1) функциональные условия: работа цепи в качестве стабилизатора напряжения, индикатора напряжения, триггера и т. п. и 2) энергетические условия: получение максимальной отдачи мощности, максимального к. п. д. и т. д.

Результатом синтеза должно явиться определение параметров линейных элементов цепи, значений токов, напряжений и мощностей в этих элементах для каждой точки характеристики нелинейного элемента. Задача может быть разрешена и притом однозначно в том случае, если число линейных элементов цепи  $M$  равно числу  $N$  заданных условий работы.

Пусть наша цепь (рис. 3) содержит лишь один источник, расположенный в ветви  $A$ . Можно представить его как источник напряжения  $U_A$  (рис. 3, $\theta$ ) или как источник тока  $I_A$  (рис. 3, $\delta$ ). Рассмотрим сперва примеры функциональных условий. Зададим цепи функцию индикатора напряжения. Эта функция заключается в том, что при известных конечных значениях входных величин  $U_A$  и  $I_A$  выходные величины  $U_B$  и  $I_B$  должны быть равны нулю и отклоняться от нуля в соответствующую сторону при отклонении входных величин (точка И на рис. 6, $\alpha$ ). Такие

нелинейные цепи находят частое применение в автоматических регуляторах напряжения, регуляторах напряжения, вольтметрах с подавленным нулем и т. п.

Разделим обе части уравнения (6) на  $U_A$  и обе части уравнения (10) на  $I_A$  и приравняем их нулю:

$$\frac{I_B}{U_A} = g_{AB} = g_{AB\kappa} - \frac{g_{A1\kappa} g_{1B\kappa}}{g_1 + g_{11\kappa}} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{U_B}{I_A} = r_{AB} = r_{AB\kappa} - \frac{r_{A1\kappa} r_{1B\kappa}}{r_1 + r_{11\kappa}} = 0. \quad (19)$$

Любое из выражений (18) и (19) может служить условием индикации напряжения.

Рассмотрим теперь функцию стабилизации напряжений, т. е. такую работу цепи, при которой изменение входных величин  $U_A$  и  $I_A$  в известном диапазоне не вызывает изменения выходных величин  $U_B$  и  $I_B$ , имеющих конечное значение (точка С на рис. 6, $\alpha$ ). Для определения производных выходных величин по входным воспользуемся теоремой о нелинейном четырехполюснике, изложенной автором в предыдущей работе [Л. 3], заменим в выражениях (18) и (19) статические параметры нелинейных элементов динамическими и приравняем эти выражения нулю:

$$\frac{dI_B}{dU_A} = \gamma_{AB} = g_{AB\kappa} - \frac{g_{A1\kappa} g_{1B\kappa}}{\gamma_1 + g_{11\kappa}} = 0, \quad (20)$$

$$\frac{dU_B}{dI_A} = \rho_{AB} = r_{AB\kappa} - \frac{r_{A1\kappa} r_{1B\kappa}}{\rho_1 + r_{11\kappa}} = 0. \quad (21)$$

Любое из выражений (20) и (21) может служить условием индикации напряжения.

Наконец, рассмотрим функцию цепи релейного действия (триггера), в которой при достижении известных значений входных величин  $U_A$  и  $I_A$  выходные величины  $U_B$  и  $I_B$  изменяются скачком. Очевидно, для получения условия скачка выражения (20) и (21) следует приравнять бесконечности. Получим:

$$\gamma_{AB} = \infty, \quad (22)$$

$$\rho_{AB} = \infty. \quad (23)$$

Заметим, что поскольку сопротивления (проводимости) линейных элементов цепи конечны и существенно положительны, то индикация и стабилизация напряжения могут быть, вообще говоря, достигнуты как при положительном, так и при отрицательном динамическом сопротивлении (проводимости) нелинейного элемента (статические значения их всегда положительны), тогда как скачок может быть получен лишь при отрицательном значении динамического сопротивления (проводимости) нелинейного элемента.

Условие скачка сводится к одному из следующих простых равенств:

$$\gamma_1 = -g_{11\kappa}, \quad (24,\alpha)$$

$$\rho_1 = -r_{11\kappa}. \quad (24,\beta)$$

Примеры энергетических условий работы цепи будут рассмотрены ниже при расчете мостовой цепи.

Весьма важную роль в синтезе нелинейной цепи играет возможность выражения ее характеристик в безразмерных единицах. Для этой цели будем определять отношения токов, напряжений и мощностей на интересующих нас участках цепи соответственно к токам, напряжениям и мощностям на нелинейном элементе или на каком-либо другом участке цепи. Возможность получения безразмерных характеристик может быть показана в общих чертах следующим образом. Взаимные и собственные проводимости короткого замыкания и сопротивления холостого хода суть функции параметров  $M$  линейных элементов цепи.

Если число  $N$  заданных условий работы цепи равно числу  $M$  линейных элементов цепи, то задача сводится к решению системы из  $M$  уравнений с  $M$  неизвестными. Неизвестными здесь являются параметры линейных элементов, а решение представляет собой выражение этих параметров через одни только параметры нелинейного элемента ( $r, \rho, g, \gamma$ ).

Взаимные и собственные параметры цепи также, конечно, будут при этом выражаться исключительно через параметры нелинейного элемента

$$\left. \begin{array}{l} g_{ij} = \varphi(\gamma, g) \\ r_{ij} = \psi(\rho, r) \end{array} \right\} \quad (25)$$

Определим, например, отношение тока  $I_B$  в ветви  $B$  к току  $I_1$  нелинейного элемента (рис. 3). В результате решения цепи находим выражения взаимных проводимостей  $g_{AB}$  и  $g_{A1}$  в функции параметров  $\gamma$  и  $g$  нелинейного элемента

$$g_{AB} = \varphi_B(\gamma, g), \quad (26)$$

$$g_{A1} = \varphi_1(\gamma, g). \quad (27)$$

Отсюда имеем:

$$\delta = \frac{I_B}{I_1} = \frac{U_A \varphi_B(\gamma, g)}{U_A \varphi_1(\gamma, g)} = \frac{\varphi_B(\gamma, g)}{\varphi_1(\gamma, g)} = F(\gamma, g). \quad (28)$$

Получаемые отношения являются безразмерными величинами и могут быть выражены через единственную переменную: относительное сопротивление  $k$ , или относительную проводимость  $k_g$ .

Если искать не отношения, а производные (например,  $\frac{dI_B}{dI_A}$ ), то они также могут быть выражены через  $k$ , или  $k_g$ . Заметим, что получаемые выражения не только безразмерны, но и универсальны. Они справедливы для любого нелинейного элемента при данном построении цепи и при заданных условиях работы цепи.

**Синтез симметричного нелинейного моста.** В качестве примера рассмотрим мостовую цепь

(рис. 5), содержащую в двух противоположных плечах одинаковые нелинейные элементы ( $r_1; g_1; \rho_1; \gamma_1$ ), в других плечах одинаковые линейные сопротивления  $R_C$  (проводимости  $G_C$ ) и в диагонали линейное сопротивление  $R_B$  (проводимость  $G_B$ ).

Раньше всего определим некоторые из взаимных и собственных параметров моста, пользуясь методами эквивалентной э. д. с. и эквивалентного тока. Для цепи, обладающей такой симметрией, как рассматриваемый мост, нетрудно получить выражения взаимных параметров  $g_{AB}$  и  $r_{AB}$ , отличающиеся от формул (18) и (19) лишь тем, что в числителе второго члена добавляется коэффициент 2, а в знаменателе — слагаемое  $g_{12\kappa}$  или  $r_{12o}$  — взаимная проводимость или сопротивление ветвей, в которых расположены нелинейные элементы [Л. 4].

$$\frac{I_B}{U_A} = g_{AB} = g_{AB\kappa} - \frac{2g_{A1\kappa} g_{1B\kappa}}{g_1 + g_{11\kappa} + g_{12\kappa}}, \quad (29)$$

$$\frac{U_B}{I_A} = r_{AB} = r_{ABo} - \frac{2r_{A1o} r_{1Bo}}{r_1 + r_{11o} + r_{12o}}. \quad (30)$$

Определим значение проводимостей при коротком замыкании и сопротивлений при холостом ходе, входящих в формулы (29) и (30). При этом надо иметь в виду, что при определении первых следует считать сопротивление цепи питания равным нулю, а при определении вторых — равным бесконечности

$$\left. \begin{array}{l} g_{AB\kappa} = g_{1B\kappa} = g_{12\kappa} = G_B, \\ g_{A1\kappa} = g_{11\kappa} = G_B + G_C, \end{array} \right\} \quad (31)$$

$$\left. \begin{array}{l} r_{ABo} = r_{1Bo} = r_{12o} = R_B, \\ r_{A1o} = r_{11o} = R_B + R_C. \end{array} \right\} \quad (32)$$

Подставляя (31) в (29) и (32) в (30), получим:

$$\frac{I_B}{U_A} = g_{AB} = G_B \frac{g_1 - G_C}{g_1 + 2G_B + G_C}, \quad (33)$$

$$\frac{U_B}{I_A} = r_{AB} = -R_B \frac{r_1 - R_C}{r_1 + 2R_B + R_C}. \quad (34)$$

Знак минус перед выражением (34) здесь введен из следующих соображений. Если принять направ-

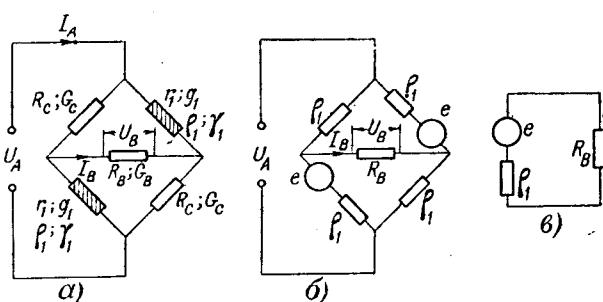


Рис. 5. Симметричная мостовая цепь и ее преобразования.

ление тока в диагонали моста при коротком замыкании нелинейных плеч за положительное, то при холостом ходе ток будет иметь отрицательный знак. Следовательно, если взаимные проводимости  $g_{AB}$  и  $g_{1B}$  считать положительными, то взаимные сопротивления  $r_{AB}$  и  $r_{1B}$  должны быть отрицательными.

Из выражения (33) может быть легко получено следующее:

$$\frac{U_B}{U_A} = \frac{R_C - r_1}{r_1 + R_C + \frac{2r_1 R_C}{R_B}}. \quad (35)$$

Если разделить (34) на (35), то получим:

$$\frac{U_A}{I_A} = r_{AA} = \frac{(r_1 + R_C) R_B + 2r_1 R_C}{r_1 + 2R_B + R_C}. \quad (36)$$

Перейдем теперь собственно к синтезу цепи. В данном случае имеется только два неизвестных линейных сопротивления, поэтому достаточно задать всего два условия для определения их значений. Рассмотрим в первую очередь мостовой индикатор напряжения (функциональное условие) с максимальной отдачей мощности (энергетическое условие). Функциональное условие индикации напряжения, выражаемое в общем виде равенствами (18) или (19), в данном случае получается путем приравнивания выражения (35) нулю. В результате имеем следующее условие индикации:

$$R_C = r_1, \quad (37)$$

т. е. сопротивление линейного плеча моста должно быть равно статическому сопротивлению нелинейного элемента.

Для получения выражения коэффициента усиления  $\mu$  моста заменим в выражении (35)  $R_C$  на  $r_1$ , согласно условию (37), а  $r_1$  на  $r_1$  в соответствии с теоремой о нелинейном четырехполюснике [Л. 3]:

$$\mu = \frac{dU_B}{dU_A} = \frac{r_1 - r_1}{r_1 + r_1 + \frac{2r_1 R_C}{R_B}}. \quad (38)$$

Для определения условия максимальной отдачи мощности найдем производную выходной мощности  $P_B$  по напряжению  $U_A$ :

$$\lambda = \frac{dP_B}{dU_A} = \frac{d\left(\frac{U_B^2}{R_B}\right)}{dU_A} = \frac{2U_B}{R_B} \frac{dU_B}{dU_A}. \quad (39)$$

Однако, поскольку в точке индикации  $U_B = 0$ , то и  $\lambda = 0$ . Поэтому найдем следующую производную:

$$\frac{d^2P_B}{dU_A^2} = \frac{2}{R_B} \left[ \left( \frac{dU_B}{dU_A} \right)^2 + \frac{d^2U_B}{dU_A^2} \cdot U_B \right] = \frac{2\mu^2}{R_B}. \quad (40)$$

Подставляя в (40) значение  $\mu$  из (38), дифференцируя получившееся выражение по  $R_B$  и приравнивая результат нулю, получаем условие максимальной отдачи мощности:

$$R_B = \frac{2r_1 r_1}{r_1 + r_1}. \quad (41)$$

Подставляя это условие в (38), деля числитель и знаменатель на  $r_1$ , получаем выражение коэффициента усиления симметричного индикаторного моста с максимальной отдачей мощности в безразмерных единицах (через относительное сопротивление нелинейного элемента):

$$\mu = \frac{1 - k_r}{2(1 + k_r)}. \quad (42)$$

Заметим, что при всех положительных значениях  $k_r$  абсолютное значение коэффициента усиления  $\mu$  не может превышать 0,5.

Рассмотрим теперь мостовой стабилизатор напряжения (функциональное условие) с максимальной отдачей мощности или максимальным к. п. д. (энергетическое условие). Функциональное условие стабилизации напряжения, выражаемое в общем виде равенствами (20) и (21), в данном случае получится, если в соответствии с теоремой о нелинейном четырехполюснике [Л. 3.], заменить в выражении (35)  $r_1$  на  $r_1$ , и приравнять его нулю

$$\frac{dU_B}{dU_A} = \frac{R_C - r_1}{r_1 + R_C + \frac{2r_1 R_C}{R_B}} = 0. \quad (43)$$

В результате получаем следующее условие стабилизации:

$$R_C = r_1, \quad (44)$$

т. е. сопротивление линейного плеча моста должно быть равно динамическому сопротивлению нелинейного элемента.

На рис. 5,б показана та же мостовая схема, что и на рис. 5,а, но с заменой  $R_C$  на  $r_1$  и нелинейного элемента на эквивалентную цепь, состоящую из источника э. д. с.  $e$  и динамического сопротивления  $r_1$ . Мост рис. 5,б—равноплечий и взаимная проводимость диагоналей  $A$  и  $B$  равна нулю, поэтому диагональ  $A$  можно, например, разомкнуть не изменяя ток и напряжение в диагонали  $B$ . В результате цепь приводится к виду рис. 5,а. Отсюда сразу получаем выражения выходного напряжения и выходной мощности:

$$U_B = \frac{e \cdot R_B}{r_1 + R_B}, \quad (45)$$

$$P_B = \frac{e^2 R_B}{(r_1 + R_B)^2}. \quad (46)$$

Из выражения (46) находим условие максимальной отдачи мощности (при фиксированном значении тока и напряжении нелинейного элемента):

$$R_B = \rho_1. \quad (47)$$

Подставляя (47) в (45) и пользуясь формулой (13), получаем:

$$U_B = \frac{I_1(\rho_1 - r_1)}{2}. \quad (48)$$

Отсюда нетрудно найти отношение выходного напряжения  $U_B$  к напряжению нелинейного элемента  $U_1 = I_1 r_1$ , выраженное через безразмерную величину относительного сопротивления нелинейного элемента

$$\alpha_B = \frac{U_B}{U_1} = \frac{k_r - 1}{2}. \quad (49)$$

Подставляя (44), (47) и (48) в (35), получаем аналогично:

$$\alpha_A = \frac{U_A}{U_1} = \frac{k_r + 3}{2}. \quad (50)$$

Можно определить также величину отношения выходной мощности  $P_B$  к мощности нелинейного элемента  $P_1 = I_1^2 r_1$ :

$$\beta_B = \frac{P_B}{P_1} = \frac{(k_r - 1)^2}{4k_r}. \quad (51)$$

Наконец, представляет интерес к. п. д. мостового стабилизатора. Общее выражение его получается путем использования формул (35), (36) и (44).

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{P_B}{P_A} = \frac{U_B^2 \cdot r_{AA}}{U_A^2 R_B} = \\ &= \frac{(\rho_1 - r_1)^2 R_B}{[(\rho_1 + r_1) R_B + 2\rho_1 r_1](\rho_1 + r_1 + 2R_B)}. \end{aligned} \quad (52)$$

Подставляя сюда условие максимальной отдачи мощности (47), имеем:

$$\eta_1 = \frac{(k_r - 1)^2}{(k_r + 3)(3k_r + 1)}. \quad (53)$$

Заметим, что при любых положительных значениях  $k_r$ , к. п. д.  $\eta_1$  в этом случае не может быть больше  $\frac{1}{3}$ .

Другим энергетическим условием для мостового стабилизатора может, например, служить условие максимума  $\eta$ . Определяя максимум выражения (52) в функции  $R_B$ , находим, что максимум наступает при

$$R_B = \sqrt{\rho_1 r_1}. \quad (54)$$

Если подставить (54) в (52), то после преобразований получим:

$$\eta_2 = \left( \frac{\sqrt{k_r} - 1}{\sqrt{k_r} + 1} \right)^2. \quad (55)$$

При этом, разумеется,  $\eta_2 > \eta_1$ . Но поскольку условие (47) уже не соблюдается, то увеличению к. п. д. сопутствует уменьшение выходной мощности  $P_B$  (очевидно,  $P_A$  уменьшается еще более резко).

Если использовать формулы (13), (46) и (54), то отношение выходной мощности  $P_B$  в последнем случае к мощности нелинейного элемента  $P_1$  получается следующим:

$$\beta'_B = \frac{P'_B}{P_1} = \frac{(\sqrt{k_r} - 1)^2}{\sqrt{k_r}}. \quad (56)$$

Легко видеть, что  $\beta'_B < \beta_B$ .

В заключение рассмотрим мостовую релейную цепь (триггер) с термосопротивлениями. В качестве заданных условий возьмем в данном случае следующие два функциональных условия: 1) релейный эффект (скачок), 2) выходное напряжение  $U_B$  в момент начала скачка должно быть равно нулю.

Условие скачка, выраженное в общем виде для одного нелинейного элемента формулами (22) и (23), в данном случае получится, если выражение (43) приравнять бесконечности. Учитывая, что динамическое сопротивление нелинейного элемента для получения скачка должно иметь отрицательный знак и обозначая  $\rho_1$  его абсолютное значение, получим:

$$\frac{dU_B}{dU_A} = \frac{R_C + \rho_1}{R_C - \rho_1 - \frac{2\rho_1 R_C}{R_B}} = \infty. \quad (57)$$

В результате условие скачка сводится к равенству

$$R_C - \rho_1 - \frac{2\rho_1 R_C}{R_B} = 0. \quad (58)$$

Согласно второму условию триггер должен работать, как это показано на рис. 6, б, в, а именно  $U_B = 0$  в момент начала скачка при повышении приложенного напряжения  $U_A$  (рис. 6, б) или при понижении его (рис. 6, в). Поскольку в эти моменты мост находится в равновесии, то и в данном случае должно быть действительно равенство (37). Совместное решение (37) и (58) позволяет определить сопротивление диагонали моста  $P_B$  через параметры нелинейного элемента:

$$R_B = \frac{2\rho_1 r_1}{r_1 - \rho_1}. \quad (59)$$

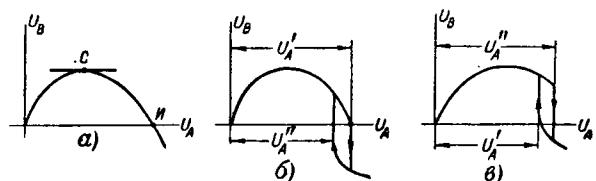


Рис. 6. Действие мостовой цепи в качестве индикатора, стабилизатора и реле.

Заметим, что заданное действие триггера возможно лишь при условии  $\rho_1 < r_1$ . Определим значения входного напряжения  $U_A'$  при скачке от состояния  $U_B = 0$  и напряжение  $U_A''$  при возвратном скачке. Решая цепь симметричного моста, например, методом эквивалентного тока, и подставляя (32), получим в общем виде:

$$\delta_A = \frac{U_A}{U_1} = \frac{(r_1 + R_C) R_B + 2r_1 R_C}{(R_B + R_C) r_1}. \quad (60)$$

Исходя из второго условия, легко видеть, что при прямом скачке

$$\delta_A' = \frac{U_A'}{U_1} = 2. \quad (61)$$

Обратный скачок, очевидно, произойдет тогда, когда при изменении входного напряжения динамическое сопротивление  $\rho_1$  нелинейного элемента снова приобретет то же значение, определяемое равенством (58), что и при первом скачке. Напряжение на нелинейном элементе и статическое сопротивление нелинейного элемента приобретают при этом новые значения  $U_1'$  и  $r_1'$ . Сопротивление диагонали и линейных плеч моста, разумеется, остается неизменным. Заменяя в выражении (30)  $U_1$  и  $r_1$  на  $U_1'$  и  $r_1'$  и подставляя (37) и (59), получим:

$$\delta_A'' = \frac{U_A''}{U_1'} = 2 \frac{r_1'(\rho_1 + r_1')}{r_1'(\rho_1 + r_1)}. \quad (62)$$

Поясним сказанное выше графически. Полупроводниковые термосопротивления (термисторы) часто имеют, как известно, вольтамперную характеристику вида, показанного на рис. 7. Там же построены в масштабе динамическое  $\rho_1$  и статическое  $r_1$  сопротивления нелинейного элемента (для большей ясности масштаб  $\rho_1$  увеличен по сравнению с масштабом  $r_1$  в 4 раза). Если триггер настроен так, что обратный скачок получается при понижении приложенного напряжения (рис. 6, б), то величина  $r_1'$  находится построением (пунктир) по точкам в последовательности 1, 2, 3, 4, показанной на рис. 7. При этом работа триггера по рис. 6, б может, очевидно, иметь место, если при прямом скачке  $I_p > I_{p-\max}$ . Работа триггера по рис. 6, в получится, если при прямом скачке  $I_p < I_{p-\max}$ , а  $r_1'$  найдется построением в обратной последовательности 4, 3, 2, 1. Для выражения  $\delta_A''$  в безразмерных единицах введем, кроме относительного сопротивления нелинейного элемента  $k_r$ , величину:

$$k_r' = \frac{\rho_1}{r_1}. \quad (63)$$

Величины  $k_r$  и  $k_r'$  также построены в масштабе на рис. 7, причем начало координат для них в

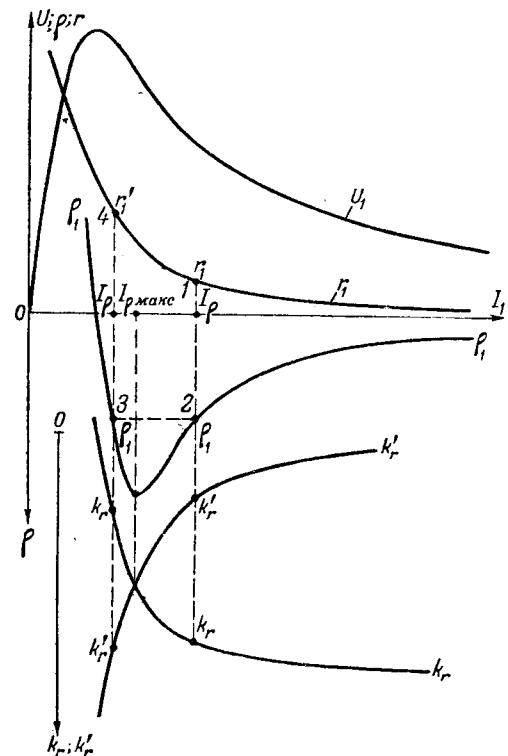


Рис. 7. Характеристика полупроводникового термосопротивления. Зависимости напряжения  $U_1$ , статического  $r_1$ , динамического  $\rho_1$  и относительных  $k_r$  и  $k_r'$  сопротивлений от тока (масштаб  $\rho_1$  в 4 раза больше масштаба  $r_1$ ).

целях большей отчетливости смешено вниз. Формула (62) приобретает следующий вид:

$$\delta_A'' = 2 \frac{k_r' + 1}{k_r' + 1}. \quad (64)$$

Полученные безразмерные формулы (42), (49), (50), (51), (53), (54), (56) и (64) для трех случаев работы моста справедливы для данной схемы и заданных условий и пригодны для любых нелинейных элементов. Они выражаются через единственный параметр нелинейного элемента — относительное сопротивление. Полученные формулы не исчерпывают расчета моста: могут быть найдены значения напряжений и токов во всех ветвях цепи. Возможно также рассмотрение ряда других режимов цепи.

Из вышеизложенного вытекает следующий порядок синтеза цепи. Определяются статические ( $r$  или  $g$ ), динамические ( $\rho$  или  $\gamma$ ) и относительные ( $k_r$  или  $k_g$ ) параметры нелинейного элемента в функции его тока или напряжения. По соответствующим формулам через найденные статические и динамические параметры определяются параметры линейных элементов цепи. Значение относительного параметра ( $k_r$  или  $k_g$ ) подставляется в соответствующую безразмерную формулу. Если искомая величина сама по себе безразмерна (коэффициент усиления, к. п. д.), то на этом определение заканчивается, а если она размерна (напряжение, ток, мощность), то полученная величина (например,  $a$ ,  $\beta$  и т. д.) умножается на напряже-

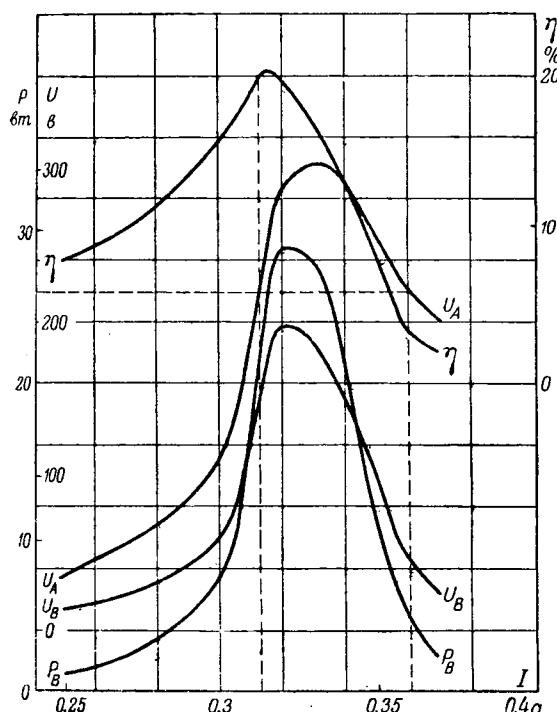


Рис. 8. Режимы мостового стабилизатора с бареттером 0,3Б17-35. Зависимости выходного  $U_B$  и входного  $U_A$  напряжений, выходной мощности  $P_B$  и к. п. д.  $\eta$  от тока бареттера.

ние, ток или мощность нелинейного элемента в той рабочей точке, в которой определено значение  $k_r$  или  $k_g$ .

Таким образом, для каждой рабочей точки во всем возможном диапазоне характеристики нелинейного элемента могут быть найдены сопротивления и проводимости линейных элементов, токи, напряжения и мощности во всех ветвях, коэффициенты усиления, к. п. д. и другие величины и выбраны оптимальные их значения.

**Числовой пример.** Пусть бареттеры 0,3Б17-35, характеристики которых показаны на рис. 2, включены в мостовую схему (рис. 5), работающую в качестве стабилизатора напряжения. Поставим энергетическим условием работы схемы максимальную отдачу мощности. Тогда, зная зависимость относительного сопротивления  $k_r$  бареттера от

тока  $I_1$  и напряжения  $U_1$  бареттера, можно, пользуясь формулами (49), (50), (51) и (53), построить зависимость выходного напряжения  $U_B$ , входного напряжения  $U_A$ , выходной мощности  $P_B$  и к. п. д.  $\eta$  от тока бареттера, например,

$$U_B = \alpha_B U_1 = \frac{k_r - 1}{2} U_1,$$

$$P_B = \beta_B P_1 = \frac{(k_r - 1)^2}{4k_r} U_1 I_1.$$

Это построение выполнено на рис. 8. Из кривых видно, что в данном случае могут быть получены в различных режимах следующие максимальные значения:  $U_B \text{ макс} = 200 \text{ в}$ ,  $U_A \text{ макс} = 300 \text{ в}$ ,  $P_B \text{ макс} = 29 \text{ вт}$ ,  $\eta \text{ макс} = 20,5\%$ . Пусть нам требуется стабилизировать напряжение  $U_A = 220 \text{ в}$ . По рис. 8 мы видим, что этому условию удовлетворяют две точки кривой  $U_A = f(I_1)$ . Соответственно получаем два возможных режима стабилизатора. Определяя сопротивления плеча  $R_c$  и диагонали  $R_B$  [формулы (44) и (47)], а также выходные и входные напряжения, выходную мощность и к. п. д., находим по кривым рис. 2 и 8 следующие данные этих режимов:

	$I_1, \text{ а}$	$U_1, \text{ в}$	$R_B = -R_c, \text{ ом}$	$U_B, \text{ в}$	$U_A, \text{ в}$	$P_B, \text{ вт}$	$\eta, \%$
1 режим	0,316	38	1 270	154	220	22,5	20
2 режим	0,36	86	500	46	220	4,5	3,5

Конечно, первый режим более благоприятен.

#### Литература

1. К. М. Поливанов. Теорема вариации параметров линейной электрической цепи. Электричество, № 2, стр. 60, 1946.
2. А. В. Нетушил. О применении принципа наложения при расчете нелинейных цепей. Электричество, стр. 53, № 8, 1950.
3. С. А. Гинзбург. Теорема о нелинейном четырехполюснике. Электричество, стр. 68, № 9, 1950.
4. С. А. Гинзбург. Анализ симметричных измерительных цепей автоматики. Труды МЭИ им. Молотова. Вып. X (Автоматика и Телемеханика), 1952.
5. С. А. Гинзбург. Расчет нелинейного моста. Труды МЭИ им. Молотова. Вып. VIII (Электротехника), 1952.

[17.10.1951]



# Теория мощности системы периодических многофазных токов

Доктор техн. наук, доц. Г. Е. ПУХОВ

Томский политехнический институт им. Кирова

**1. Предварительные замечания.** В многофазных электрических цепях при установившемся синусоидальном режиме различают три вида мощности: активную  $P$ , реактивную  $Q$  и кажущуюся мощность  $S$ . Величины  $P$  и  $Q$  находят как алгебраические суммы мощностей отдельных фаз<sup>1</sup>

$$P = \sum_{k=1}^m P_k = \sum_{k=1}^m U_k I_k \cos \varphi_k = \left( \sum_{k=1}^m \dot{U}_k \dot{I}_k \right)_{\partial}, \quad (1,1)$$

$$Q = \sum_{k=1}^m Q_k = \sum_{k=1}^m U_k I_k \sin \varphi_k = \left( \sum_{k=1}^m \dot{U}_k \dot{I}_k \right)_{\mu}, \quad (1,2)$$

где  $m$  — число фаз.

Понятие кажущейся мощности  $S$  четко еще не установлено. В ряде работ [Л. 1...7] приводятся формулы, дающие в общем случае различные значения мощности  $S$ . Еще более неясным является вопрос о кажущейся мощности многофазных несинусоидальных токов.

С нашей точки зрения под кажущейся мощностью в самом общем случае следует понимать ту максимальную активную мощность, которую можно получить от питающей части цепи при заданных действующих значениях ее фазных напряжений и токов в соединительных проводах<sup>2</sup>.

По физическому смыслу такое определение вполне соответствует общепринятым пониманию кажущейся мощности для случая однофазной нагрузки, как расчетной величины, показывающей значение минимально необходимой мощности генератора, предназначенного для питания этой нагрузки.

Нетрудно усмотреть, что при указанном понимании кажущаяся мощность

$$S = \sum_{k=1}^n U_k I_k, \quad (1,3)$$

где  $n$  — число проводов;

Рассматривается теория мощности несимметричных многофазных цепей при установившемся периодическом режиме работы.

$I_k$  — действующее значение тока  $k$ -того провода;

$U_k$  — действующее значение напряжения на  $k$ -той фазе питающего устройства, причем нулевой провод, если он имеется, считается фазой с э. д. с., равной нулю.

В случае питания нагрузки от цепи со сложной внутренней структурой, понятие „фазное напряжение“, естественно, должно относиться к эквивалентному генератору, от которого можно было бы получить требуемые токи в проводах и напряжения между проводами. Заметим, что решение задачи о нахождении такого генератора не является однозначным [Л. 4, 8] и, следовательно, будет возможно лишь при привлечении дополнительных условий, например, предположения о симметричности генератора и т. п. Однако это не может, разумеется, повлиять на вид формулы (1,3).

Между мощностями  $P$ ,  $Q$  и  $S$  существуют определенные взаимные связи, выяснению которых и посвящается настоящая работа. Изложение вопроса произведем в следующем порядке. Вначале кратко рассмотрим используемые математические понятия и операции. Затем получим выражения действующих значений систем периодических токов и напряжений и рассмотрим способ их символического изображения. Наконец, выведем соответствующие выражения для различных видов мощности, сначала синусоидальных, а затем уже и несинусоидальных токов.

**2. Некоторые математические понятия и операции.** Назовем  $n$ -мерным вектором  $\mathbf{A}$  систему из  $n$  чисел, расположенных в определенном порядке, и будем записывать его так [Л. 9]:

$$\mathbf{A} = (A_1, A_2, \dots, A_n), \quad (2,1)$$

где  $A_k$  — компоненты вектора  $\mathbf{A}$ . Если эти компоненты комплексные числа  $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dots, \dot{A}_n$ , то вектор будем обозначать через  $\dot{\mathbf{A}}$ . При замене  $\dot{A}_k$  на сопряженные комплексы  $\hat{A}_k$  — соответствующий вектор примет вид  $\hat{\mathbf{A}}$ .

Длину (абсолютную величину) вектора  $\mathbf{A}$

<sup>1</sup>  $\partial$ ,  $m$  — указывают на действительную и мнимую части.

<sup>2</sup> Аналогичное определение кажущейся мощности применял И. Розенцвейг [Л. 4].

определим как корень квадратный из суммы квадратов абсолютных значений его компонент:

$$A = |\mathbf{A}| = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n A_k^2}. \quad (2,2)$$

Длины векторов  $\mathbf{A}$ ,  $\dot{\mathbf{A}}$  и  $\hat{\mathbf{A}}$  при условии, что компонентами  $\mathbf{A}$  являются модули компонент вектора  $\dot{\mathbf{A}}$ , т. е. при  $A_k = |\dot{A}_k|$ , очевидно, будут одинаковы, т. е.  $|\mathbf{A}| = |\dot{\mathbf{A}}| = |\hat{\mathbf{A}}| = A$ .

Кроме понятий многомерного вектора и его длины, нам далее понадобятся еще определения скалярного и векторного произведений двух векторов.

Под скалярным произведением  $n$ -мерных векторов  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  будем понимать число, равное алгебраической сумме произведений их одноименных (первых, вторых и т. д.) компонент:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = A_1 B_1 + A_2 B_2 + \dots + A_n B_n = \sum_{k=1}^n A_k B_k. \quad (2,3)$$

Векторным произведением векторов  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  назовем  $\frac{n(n-1)}{2}$  мерный вектор, определяемый выражением

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \times \mathbf{B} = & (A_1 B_2 - A_2 B_1, A_1 B_3 - A_3 B_1, \dots, \\ & A_1 B_n - A_n B_1, \\ & A_2 B_3 - A_3 B_2, A_2 B_4 - A_4 B_2, \dots, A_2 B_n - A_n B_2, \quad (2,4) \\ & A_3 B_4 - A_4 B_3, \dots, A_{n-1} B_n - A_n B_{n-1}). \end{aligned}$$

Длина вектора  $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$  находится обычным путем на основании (2,2):

$$|\mathbf{A} \times \mathbf{B}| = \sqrt{\sum_{k,l} |A_k B_l - A_l B_k|^2}, \quad (2,5)$$

где значки  $k$  и  $l$  выбираются в соответствии с (2,4).

Непосредственной подстановкой можно было бы доказать, что между произведениями длин векторов и абсолютными значениями их векторных и скалярных произведений существуют связи, выражаемые зависимостями

$$|\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}|^2 + |\mathbf{A} \times \mathbf{B}|^2 = |\mathbf{A}|^2 |\mathbf{B}|^2, \quad (2,6)$$

$$|\dot{\mathbf{A}} \cdot \dot{\mathbf{B}}|^2 + |\dot{\mathbf{A}} \times \dot{\mathbf{B}}|^2 = |\dot{\mathbf{A}}|^2 |\dot{\mathbf{B}}|^2. \quad (2,7)$$

Если компоненты векторов, в свою очередь, являются некоторыми, допустим  $s$ -мерными, векторами, то скалярное произведение находится обычным путем<sup>3</sup>:

$$\bar{\mathbf{A}} \cdot \bar{\mathbf{B}} = \sum_{k=1}^n \mathbf{A}_k \cdot \mathbf{B}_k = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^s A_{kl} B_{kl}, \quad (2,8)$$

<sup>3</sup> Четка, поставленная над вектором, указывает на то, что его компонентами являются тоже векторы.

где

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{A}} = & (\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_n), \\ \bar{\mathbf{B}} = & (\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_n), \end{aligned} \quad (2,9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_k = & (A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{ks}), \\ \mathbf{B}_k = & (B_{k1}, B_{k2}, \dots, B_{kn}), \end{aligned} \quad (2,10)$$

а векторное произведение после предварительного переписывания  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  в виде:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{A}} = & (A_{11}, \dots, A_{1s}, A_{21}, \dots, A_{2s}, \dots, \\ & A_{n1}, \dots, A_{ns}), \\ \bar{\mathbf{B}} = & (B_{11}, \dots, B_{1s}, B_{21}, \dots, B_{2s}, \dots, \\ & B_{n1}, \dots, B_{ns}), \end{aligned} \quad (2,11)$$

находится по формуле (2,4), т. е.

$$\bar{\mathbf{A}} \times \bar{\mathbf{B}} = (A_{11} B_{12} - A_{12} B_{11}, \dots, A_{11} B_{ns} - A_{ns} B_{11}, \dots, A_{n,s-1} B_{ns} - A_{ns} B_{n,s-1}). \quad (2,12)$$

**3. Действующие значения систем периодических токов и напряжений.** Для облегчения дальнейших рассуждений введем понятия о действующих (среднеквадратичных) значениях систем токов и напряжений, определяющих их тепловое действие [Л, 4].

Включив в провода  $n$ -проводной цепи  $n$  одинаковых амперметров, обнаруживаем, что количество тепла, выделенное в их сопротивлениях системой периодических токов  $i_1, i_2, \dots, i_n$ , пропорционально

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{T} \int_0^T r_a i_k^2 dt = r_a \sum_{k=1}^n I_k^2 \quad (3,1)$$

( $r_a$  — внутреннее сопротивление каждого из амперметров, а  $I_k$  — показание  $k$ -того амперметра).

Таким образом, тепловое действие системы токов характеризуется квадратичной формой  $\sum I_k^2$ .

Ток

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_k^2} \quad (3,2)$$

поэтому и является искомым действующим значением системы  $n$  периодических токов. По аналогии под действующим значением системы напряжений будем понимать:

$$U = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_k^2}. \quad (3,3)$$

Ток  $I$  и напряжение  $U$ , очевидно, могут трактоваться как длины векторов

$$I = (I_1, I_2, \dots, I_n) \quad (3,4)$$

и

$$U = (U_1, U_2, \dots, U_n),$$

которые далее будем называть векторами действующих значений систем токов и напряжений.

**4. Символическое изображение систем периодических токов и напряжений.** Периодические напряжения  $u_k$  и токи  $i_k$  после разложения в ряды Фурье всегда можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} u_k &= \sum_{l=1}^q V \bar{U}_{kl} \sin(l\omega t + \alpha_{kl}), \\ i_k &= \sum_{l=1}^q V \bar{I}_{kl} \sin(l\omega t + \beta_{kl}), \end{aligned} \right\} \quad (4,1)$$

где  $q$  — число гармоник. Далее из комплексов действующих значений гармоник можно составить векторы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{U}}_k &= (\dot{U}_{k1}, \dot{U}_{k2}, \dots, \dot{U}_{kq}), \\ \dot{\mathbf{I}}_k &= (\dot{I}_{k1}, \dot{I}_{k2}, \dots, \dot{I}_{kq}), \end{aligned} \right\} \quad (4,2)$$

где

$$\dot{U}_{kl} = U_{kl} e^{j\alpha_{kl}} \text{ и } \dot{I}_{kl} = I_{kl} e^{j\beta_{kl}}. \quad (4,3)$$

Величина  $\dot{\mathbf{U}}_k$  представляет векторно-символическое изображение периодического напряжения  $u_k$ , а  $\dot{\mathbf{I}}_k$  — подобное же изображение тока  $i_k$ . Длины векторов  $\dot{\mathbf{U}}_k$  и  $\dot{\mathbf{I}}_k$  равны действующим значениям  $u_k$  и  $i_k$ .

Для характеристики системы, определяемой  $n$  периодическими напряжениями и  $n$  токами, составим векторы:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mathbf{U}} &= (\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_n), \\ \bar{\mathbf{I}} &= (\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_n), \end{aligned} \right\} \quad (4,4)$$

компонентами которых являются выражения типа (4,2). Величины  $\bar{\mathbf{U}}$  и  $\bar{\mathbf{I}}$  представляют векторно-символические изображения систем периодических напряжений и токов. В частном случае синусоидальных функций одной и той же частоты их векторно-символические изображения (4,4) вырождаются в векторы

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{U}} &= (\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_n), \\ \dot{\mathbf{I}} &= (\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_n). \end{aligned} \right\} \quad (4,5)$$

**5. Мощности систем синусоидальных токов.** Пусть для  $n$ -проводной многофазной цепи заданы векторы систем комплексов действующих значений ее токов и напряжений  $\dot{\mathbf{U}}$  и  $\dot{\mathbf{I}}$ . Скалярное произведение векторов  $\dot{\mathbf{U}}$  и  $\dot{\mathbf{I}}$ , как нетрудно заметить, будет равно символической мощности  $\dot{P} = P + jQ$ . Отсюда следует, что активная и реактивная мощности цепи следующим образом выражаются через векторы  $\dot{\mathbf{U}}$  и  $\dot{\mathbf{I}}$ :

$$P = (\dot{\mathbf{U}} \cdot \dot{\mathbf{I}})_a, \quad (5,1)$$

$$Q = (\dot{\mathbf{U}} \cdot \dot{\mathbf{I}})_x. \quad (5,2)$$

Таким образом, активная и реактивная мощности соответственно равны действительной и мнимой частям скалярного произведения вектора системы комплексов действующих значений напряжений цепи на сопряженный вектор токов.

Заменив в векторах  $\dot{\mathbf{U}}$  и  $\dot{\mathbf{I}}$  комплексы  $\dot{U}_{kl}$  и  $\dot{I}_{kl}$  на модули  $U_{kl}$ ,  $I_{kl}$ , получим векторы действующих значений напряжений и токов цепи  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{I}$ . Кажущаяся мощность  $S$ , как это непосредственно видно из выражения (1,3), может трактоваться как скалярное произведение векторов  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{I}$ , т. е. .

$$S = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I}. \quad (5,3)$$

Нетрудно видеть, что в общем случае кажущаяся мощность  $S$  будет больше, чем модуль символической мощности  $\dot{P}$ :

$$S > |\dot{P}| = |P + jQ| = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5,4)$$

Следовательно, чтобы связать воедино мощности  $\dot{P}$ ,  $Q$  и  $S$ , необходимо ввести в рассмотрение некоторую дополнительную мощность, которую обозначим через  $T_\varphi$ . Связь между всеми этими видами мощности выражается формулой

$$S^2 = P^2 + Q^2 + T_\varphi^2. \quad (5,5)$$

Найдем выражение мощности  $T_\varphi$  через векторы  $\dot{\mathbf{U}}$  и  $\dot{\mathbf{I}}$ .

Используя зависимости (2,6), (2,7), (5,3) и замечая, что в рассматриваемом случае  $|\dot{\mathbf{U}}| = |\mathbf{U}|$  и  $|\dot{\mathbf{I}}| = |\mathbf{I}|$ , находим:

$$T_\varphi^2 = T^2 - T_a^2, \quad (5,6)$$

где

$$T = |\dot{\mathbf{U}} \times \dot{\mathbf{I}}|, \quad (5,7)$$

$$T_a = |\mathbf{U} \times \mathbf{I}|. \quad (5,8)$$

Выясним физический смысл мощностей  $T_\varphi$ ,  $T_a$  и  $T$ .

Рассмотрим случай нагрузки, фазы которой соединены в звезду с нулевым проводом очень малого сопротивления, причем допустим, что для  $k$ -той фазы ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) имеет место соотношение

$$\dot{U}_k = z_k e^{j\varphi_k} \dot{I}_k. \quad (5,9)$$

Подставляя  $\dot{U}_k$  в формулы (5,6), (5,7) и (5,8), получаем:

$$T = \sqrt{\sum_{k,l} |z_k e^{j\varphi_k} - z_l e^{j\varphi_l}|^2 I_k^2 I_l^2}, \quad (5,10)$$

$$T_a = \sqrt{\sum_{k,l} |z_k - z_l|^2 I_k^2 I_l^2}, \quad (5,11)$$

$$T_\varphi = \sqrt{\sum_{k,l} (|z_k e^{j\varphi_k} - z_l e^{j\varphi_l}|^2 - |z_k - z_l|^2) I_k^2 I_l^2}. \quad (5,12)$$

Отсюда видим, что при  $z_k = z_l$  (модули сопротивлений всех фаз равны) мощность  $T_a$  обращается в нуль. При  $\varphi_k = \varphi_l$  (углы сопротивлений всех фаз равны) нуль будет равна мощность  $T_\varphi$ . Наконец, когда имеют место оба условия, становится равной нулю и мощность  $T$ . Таким образом, мощность  $T_a$  естественно назвать мощностью амплитудной (модульной) несимметрии,  $T_\varphi$  — фазовой несимметрии, а  $T$  — полной несимметрии цепи.

Необходимость введения мощности несимметрии для многофазных цепей рассматривалась и ранее. Однако следует заметить, что в работах И. Розенцвейга и автора настоящей статьи [Л. 4, 10] мощность  $T_\varphi$  фактически принималась равной мощности  $T$ . Почти подобным же образом вычислял мощность  $T_\varphi$  и Л. С. Лурье [Л. 5].

Поскольку в общем случае  $T > T_\varphi$ , то указанные авторы получали совпадающие с (5,5) значения кажущейся мощности лишь для цепей, для которых мощность амплитудной несимметрии  $T_a$  равна нулю. При приведенном здесь определении кажущейся мощности, которого придерживается в сущности и М. Е. Сыркин [Л. 8], можно сказать, что квадрат кажущейся мощности равен сумме квадратов активной, реактивной и квадрата мощности фазной несимметрии цепи.

При  $T_a = 0$  мощность  $S$  будет равна произведению действующих значений систем напряжений и токов цепи:

$$S = |\dot{\mathbf{U}}||\dot{\mathbf{I}}| = UI, \quad (5,13)$$

где  $U$  и  $I$  находятся из (3,2) и (3,3).

**6. Мощности однофазного несинусоидального тока.** Прежде чем переходить к общему случаю многофазной цепи, посмотрим, как выразить различные виды мощности одной фазы через векторно-символические изображения ее несинусоидальных напряжения и тока:  $\dot{\mathbf{U}}_k$  и  $\dot{\mathbf{I}}_k$ .

Поскольку длины векторов  $\dot{\mathbf{U}}_k$  и  $\dot{\mathbf{I}}_k$ :

$$|\dot{\mathbf{U}}_k| = \sqrt{U_{k1}^2 + U_{k2}^2 + \dots + U_{kq}^2} = \sqrt{\sum_{l=1}^q U_{kl}^2}, \quad (6,1)$$

$$|\dot{\mathbf{I}}_k| = \sqrt{I_{k1}^2 + I_{k2}^2 + \dots + I_{kq}^2} = \sqrt{\sum_{l=1}^q I_{kl}^2}, \quad (6,2)$$

очевидно равны действующим значениям напряжения  $u_k$  и тока  $i_k$ , а скалярное произведение  $\dot{\mathbf{U}}_k$  и  $\dot{\mathbf{I}}_k$  выражает символическую мощность  $P$ , то различные виды мощности  $k$ -той фазы будут:

$$P_k = (\dot{\mathbf{U}}_k \cdot \dot{\mathbf{I}}_k)_\partial, \quad (6,3)$$

$$Q_k = (\dot{\mathbf{U}}_k \cdot \dot{\mathbf{I}}_k)_M, \quad (6,4)$$

$$S_k = |\dot{\mathbf{U}}_k||\dot{\mathbf{I}}_k|. \quad (6,5)$$

Известно, что для однофазной цепи квадрат кажущейся мощности равен сумме квадратов активной, реактивной и квадрата мощности искажения. Последняя, как это непосредственно следует из выражений (2,7), (6,3), (6,4) и (6,5), равна абсолютной величине векторного произведения векторов  $\dot{\mathbf{U}}_k$  и  $\dot{\mathbf{I}}_k$ , т. е.<sup>4</sup>

$$T_k = |\dot{\mathbf{U}}_k \times \dot{\mathbf{I}}_k|. \quad (6,6)$$

Заметим, что при желании все приведенные выражения для различных видов мощности несинусоидального однофазного тока формально можно записать аналогично выражениям, выведенным для многофазных синусоидальных токов, так как имеют место зависимости:

$$\mathbf{U}_k = (U_k), \quad \mathbf{I}_k = (I_k), \quad |\mathbf{U}_k \times \mathbf{I}_k| = T_a = 0,$$

$$\mathbf{U}_k \cdot \mathbf{I}_k = |\dot{\mathbf{U}}_k||\dot{\mathbf{I}}_k| = S_k \quad \text{и} \quad T_k = T_{k\varphi}.$$

**7. Мощности системы периодических токов.** Для  $n$ -проводной многофазной электрической цепи векторно-символические изображения ее токов и напряжений в общем случае определяются выражениями (4,4):

$$\dot{\mathbf{U}} = (\dot{\mathbf{U}}_1, \dot{\mathbf{U}}_2, \dots, \dot{\mathbf{U}}_n), \quad (7,1)$$

$$\dot{\mathbf{I}} = (\dot{\mathbf{I}}_1, \dot{\mathbf{I}}_2, \dots, \dot{\mathbf{I}}_n). \quad (7,2)$$

Векторы действующих значений системы периодических напряжений и токов

$$\mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n), \quad (7,3)$$

$$\mathbf{I} = (I_1, I_2, \dots, I_n), \quad (7,4)$$

где

$$U_k = |\dot{\mathbf{U}}_k| \quad \text{и} \quad I_k = |\dot{\mathbf{I}}_k|, \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (7,5)$$

[см. еще выражения (6,1) и (6,2)].

Пользуясь векторами  $\dot{\mathbf{U}}$ ,  $\dot{\mathbf{I}}$ ,  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{I}$ , приходим к следующим зависимостям, определяющим различные виды мощности многофазной цепи в общем случае:

$$P = (\dot{\mathbf{U}} \cdot \dot{\mathbf{I}})_\partial, \quad (7,6)$$

$$Q = (\dot{\mathbf{U}} \cdot \dot{\mathbf{I}})_M, \quad (7,7)$$

$$T = |\dot{\mathbf{U}} \times \dot{\mathbf{I}}|, \quad (7,8)$$

$$T_a = |\mathbf{U} \times \mathbf{I}|, \quad (7,9)$$

$$T_\varphi = \sqrt{|\dot{\mathbf{U}} \times \dot{\mathbf{I}}|^2 - |\mathbf{U} \times \mathbf{I}|^2}, \quad (7,10)$$

$$S = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I} = \sqrt{P^2 + Q^2 + T_\varphi^2}. \quad (7,11)$$

Мощность несимметрии  $T_\varphi$  ввиду несинусоидальности токов и напряжений может получиться отличной от нуля и в симметричной многофазной цепи и будет определяться ее мощ-

<sup>4</sup> Выражение (6,6) несколько иным путем получил также И. Розенцвейг [Л. 4].

ностью искажения. При  $T_a=0$  кажущаяся мощность цепи будет равна произведению действующих значений систем напряжений и токов цепи

$$S = |\bar{\mathbf{U}}| |\bar{\mathbf{I}}| = UI. \quad (7,12)$$

**8. Вычисление различных видов мощности трехфазной цепи.** Приведем расчетные формулы мощности для трехфазных цепей с нулевым проводом и цепей без нулевого провода, питаемых от симметричной во всех отношениях системы.

При наличии нулевого провода  $D$  напряжения и токи эквивалентного генератора будут характеризоваться символическими векторами:

$$\bar{\mathbf{U}} = (\bar{U}_{AO}, \bar{U}_{BO}, \bar{U}_{CO}, \bar{U}_{DO}), \quad (8,1)$$

$$\bar{\mathbf{I}} = (\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C, \bar{I}_D), \quad (8,2)$$

где  $O$  означает нулевую точку эквивалентного генератора, а величины  $\bar{U}_{kO}$  и  $\bar{I}_k$  равны:

$$\dot{U}_{kO} = (\dot{U}_{k1}, \dot{U}_{k2}, \dots, \dot{U}_{kq}), \quad (k=A, B, C, D), \quad (8,3)$$

$$\dot{I}_k = (\dot{I}_{k1}, \dot{I}_{k2}, \dots, \dot{I}_{kq}), \quad (8,4)$$

где  $\dot{U}_{kl}$  и  $\dot{I}_{kl}$  — комплексы действующих значений  $l$ -тых гармоник напряжений и токов в  $k$ -той фазе.

Различные виды мощности далее подсчитываются по формулам (7,6)–(7,11). Если нулевой провод имеет малое сопротивление или же точка  $D$  принимается за начало отсчета фазных напряжений, то  $\dot{U}_{DO}=0$ . При синусоидальности токов и напряжений (8,1) и (8,2) вырождаются в векторы

$$\bar{\mathbf{U}} = (\dot{U}_{AO}, \dot{U}_{BO}, \dot{U}_{CO}, \dot{U}_{DO}),$$

$$\bar{\mathbf{I}} = (\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C, \dot{I}_D).$$

Если при этом  $\dot{U}_{DO}=0$ , то окончательные формулы, определяющие мощности цепи, получаются в виде:

$$P = (\dot{\mathbf{U}} \cdot \dot{\mathbf{I}})_a = (\dot{U}_{AO} \dot{I}_A + \dot{U}_{BO} \dot{I}_B + \dot{U}_{CO} \dot{I}_C)_a, \quad (8,7)$$

$$Q = (\dot{\mathbf{U}} \cdot \dot{\mathbf{I}})_u = (\dot{U}_{AO} \dot{I}_A + \dot{U}_{BO} \dot{I}_B + \dot{U}_{CO} \dot{I}_C)_u, \quad (8,8)$$

$$T = |\dot{\mathbf{U}} \times \dot{\mathbf{I}}| = \sqrt{|\dot{U}_{AO} \dot{I}_B - \dot{U}_{BO} \dot{I}_A|^2 + |\dot{U}_{BO} \dot{I}_C - \dot{U}_{CO} \dot{I}_B|^2 + |\dot{U}_{CO} \dot{I}_A - \dot{U}_{AO} \dot{I}_C|^2} + U^2 I_D^2, \quad (8,9)$$

$$T_a = |\mathbf{U} \times \mathbf{I}| = \sqrt{|\dot{U}_{AO} \dot{I}_B - \dot{U}_{BO} \dot{I}_A|^2 + |\dot{U}_{BO} \dot{I}_C - \dot{U}_{CO} \dot{I}_B|^2 + |\dot{U}_{CO} \dot{I}_A - \dot{U}_{AO} \dot{I}_C|^2} + U^2 I_D^2, \quad (8,10)$$

$$T_\varphi = \sqrt{T^2 - T_a^2}, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T_\varphi^2} = \\ = U_{AO} I_A + U_{BO} I_B + U_{CO} I_C. \quad (8,11)$$

При отсутствии нулевого провода и при полной симметрии питающей цепи нулевая точка эквивалентного генератора совпадает с нулевой точкой искусственной звезды, составленной из трех равных сопротивлений. Обозначая через

$\dot{U}_{AO}$ ,  $\dot{U}_{BO}$  и  $\dot{U}_{CO}$  — напряжения на лучах искусственной звезды, мощности цепи при синусоидальном режиме снова можем подсчитывать по формулам (8,7)–(8,11).

**9. Заключение.** В многофазной цепи в общем случае имеются следующие виды мощностей:

1. Активная мощность  $P$ , равная действительной части скалярного произведения векторов  $\bar{\mathbf{U}}$  и  $\bar{\mathbf{I}}$ , компонентами которых служат векторно-символические изображения периодических токов в соединительных проводах и фазных напряжений питающей части цепи.

2. Реактивная мощность  $Q$ , равная мнимой части скалярного произведения  $\bar{\mathbf{U}} \cdot \bar{\mathbf{I}}$ .

3. Мощность несимметрии  $T$ , равная абсолютной величине векторного произведения векторов  $\bar{\mathbf{U}}$  и  $\bar{\mathbf{I}}$ .

Составляющими мощности  $T$  служат мощность амплитудной несимметрии  $T_a$  и фазной несимметрии  $T_\varphi$ , причем  $T_a$  определяется как абсолютная величина векторного произведения векторов  $\bar{\mathbf{U}}$  и  $\bar{\mathbf{I}}$ , компонентами которых являются действующие значения токов в соединительных проводах и фазных напряжений питающей части цепи. Сумма квадратов мощностей  $T_a$  и  $T_\varphi$  дает квадрат мощности  $T$ .

4. Кажущаяся мощность  $S$ , определяемая как та максимальная активная мощность, которая может быть получена от питающей части цепи при заданных значениях векторов  $\bar{\mathbf{U}}$  и  $\bar{\mathbf{I}}$ , равна скалярному произведению  $\bar{\mathbf{U}}$  и  $\bar{\mathbf{I}}$  или, что приводит к тому же результату, равна корню квадратному из суммы квадратов активной, реактивной и квадрата мощности фазной несимметрии цепи.

Коэффициент активной мощности, показывающий степень использования располагаемой кажущейся мощности,

$$k_a = \frac{P}{S} = \frac{(\dot{\mathbf{U}} \cdot \dot{\mathbf{I}})_a}{\mathbf{U} \cdot \mathbf{I}}. \quad (9,1)$$

Примеры применения рассмотренных зависимостей даны в приложении.

**Приложение 1.** Мощности несимметричной трехфазной цепи без нулевого провода, питаемой от источника с симметричной системой напряжений <sup>5</sup>.

Определим мощности цепи, соединенной в звезду без нулевого провода, для которой

$$Z_A = jX, \quad Z_B = -jX, \quad Z_C = 0, \quad \dot{U}_{AO} = jU,$$

$$\dot{U}_{BO} = ja^2U, \quad \dot{U}_{CO} = jaU,$$

$$I_A = ja^2I, \quad I_B = jI, \quad I_C = jaI,$$

$$U = XI, \quad a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

<sup>5</sup> Пример взят из работы И. Розенцвейга [Л. 4].

Подставляя эти величины в формулы (8,7) — (8,11), находим:

$$P = 0, Q = 0, T_a = 0, T_\varphi = S = 3UI.$$

Следовательно, в данном случае кажущаяся мощность  $S$  определяется лишь мощностью  $T_\varphi$ , отличной от нуля ввиду различного характера сопротивлений фаз нагрузки.

**Приложение 2. Мощности несимметричной двухфазной цепи с нулевым проводом при несинусоидальном режиме.** Определим мощности цепи, соединенной в звезду с нулевым проводом, к фазам которой  $A$  и  $B$  приложены напряжения:

$$u_A = \sqrt{2} 40 \sin \omega t + \sqrt{2} 30 \sin 2\omega t,$$

$$u_B = \sqrt{2} 40 \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) + \sqrt{2} 30 \sin (2\omega t - \pi).$$

В первую фазу включено сопротивление  $r_A = 2 \text{ ом}$ , во вторую — индуктивность  $L_B$ , причем  $\omega L_B = 0,5 \text{ ом}$ .

Определим векторы, входящие в формулы мощности. Имеем<sup>6</sup>

$$\dot{U}_A = (40; 30) \text{ в}; \quad \dot{U}_B = (-j40; -30) \text{ в};$$

$$|\dot{U}_A| = |\dot{U}_B| = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50 \text{ в};$$

$$\dot{i}_A = (20; 15) \text{ а}; \quad \dot{i}_B = (-80; j30) \text{ а};$$

$$|\dot{i}_A| = 25 \text{ а}; \quad |\dot{i}_B| = 85,4 \text{ а};$$

$$U = (|\dot{U}_A|, |\dot{U}_B|) = (50; 50) \text{ в};$$

$$I = (|\dot{i}_A|; |\dot{i}_B|) = (25; 85,4) \text{ а}.$$

Мощности цепи:

$$\begin{aligned} \dot{P} = \dot{U} \cdot \dot{I} = & \dot{U}_A \dot{i}_A + \dot{U}_B \dot{i}_B = (40; 30) \cdot (20; 15) + \\ & + (-j40; -30) \cdot (-80; -j30) = 1250 + j4100 \text{ вт}; \end{aligned}$$

<sup>6</sup> Вычисления производились на логарифмической линейке.

$$\begin{aligned} P = (\dot{P})_0 &= 1250 \text{ вт}, \quad Q = (\dot{P})_a = 4100 \text{ вт}; \\ S = UI &= (50; 50) \cdot (25; 85,4) = 50 \cdot 25 + 50 \cdot 85,4 = 5520 \text{ вт}; \\ T = |\dot{U} \times \dot{I}| &= |(40; 30; -j40; -30) \times \\ & \times (20; 15; -80; j30)| = 4620 \text{ вт}; \\ T_a &= |U \times I| = (50; 50) \times (25; 85,4) = 3020 \text{ вт}, \\ T_\varphi &= \sqrt{T^2 - T_a^2} = 3480 \text{ вт}. \end{aligned}$$

Проверка:

$$\begin{aligned} \sqrt{P^2 + Q^2 + T_\varphi^2} &= \sqrt{1250^2 + 4100^2 + 3480^2} = \\ &= 5520 \text{ вт} = S. \end{aligned}$$

### Литература

1. К. А. Круг. Основы электротехники. Госэнергоиздат, т. 2, 1946.
2. F. Buchholz. Die Darstellung der Begriffe „Scheinleistung“ und „Scheinarbeit“ bei Mehrphasenstrom. Elektro-Journal, 9, S. 15, 1921.
3. W. Quadde. Über Wechselströme mit beliebige Kurvenform in Dreiphasensystemen. Arch. f. El., S. 798, 1934.
4. I. Rosenzweig. Symboliczny wielowymiarowy rachunek wektorowy jako metoda analizy układów, wielofazowych. Lwów, 1939.
5. Л. С. Лурье. Кажущаяся мощность трехфазной системы. Электричество, № 1, 1951.
6. S. F. F. Elektrotechnika ogólna, т. 3, Lwów, 1934.
7. J. Bryant, J. Correll, E. Johnson. Alternating current circuits. New-York — London, 1939.
8. М. Е. Сыркин. Некоторые вопросы теории резонанса в многофазных цепях. Труды Института энергетики, УзССР, вып. 3, 1949.
9. В. И. Смирнов. Курс высшей математики. т. 3. ГТТИ, 1934.
10. Г. Е. Пухов. Теория потока энергии, когда обобщенные силы и скорости суть периодические функции времени. Научные записки ЛПИ, вып. VIII, Львов, 1949.

[10. 11. 1951]



# Рациональный выбор параметров последовательно-параллельной схемы температурной компенсации милливольтметров

Инж. Л. М. ЗАКС

Московский институт мер и измерительных приборов

Одной из наиболее распространенных схем, применяемых в милливольтметрах высокого класса, является последовательно-параллельная схема (рис. 1), обеспечивающая по сравнению с другими методами температурной компенсации (сопротивление с отрицательным температурным коэффициентом, термомагнитный шунт) наибольшее постоянство показаний прибора с течением времени.

Ряд опубликованных работ [Л. 1, 2, 3, 4, 5] посвящен анализу милливольтметров с последовательно-параллельной схемой температурной компенсации. Однако до настоящего времени в литературе нет методики определения параметров этой схемы, свободной от некоторых произвольных допущений.

В работе дается метод определения оптимальных параметров последовательно-параллельной схемы и определяются условия, при которых использование этой схемы оказывается более целесообразным, чем применение простейшей схемы с последовательным постоянным сопротивлением.

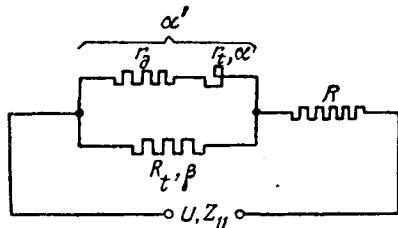


Рис. 1. Последовательно-параллельная схема.

На рис. 1 обозначено:  $r_t$ ,  $\alpha$  — сопротивление и температурный коэффициент рамки;  $r_d$  — добавочное постоянное сопротивление в цепи рамки;  $\alpha' = \frac{\alpha r_t}{r_t + r_d}$  — результирующий температурный коэффициент цепи рамки;  $R_t$ ,  $\beta$  — параллельное сопротивление и его температурный коэффициент;  $R$  — постоянное сопротивление;  $U$  — измеряемое напряжение на зажимах прибора;  $Z_{12}$  — входное сопротивление прибора.

Будем вести рассмотрение температурных погрешностей вначале без учета температурного

разработана новая методика определения оптимальных параметров последовательно-параллельной схемы температурной компенсации для милливольтметров высокого класса точности. Предлагаемая методика обеспечивает получение максимума мощности в рамке прибора: а) при данной допустимой погрешности на  $10^\circ C$ ; б) при минимуме погрешности в заданном диапазоне рабочих температур. Вторая задача решается методом наилучшего равномерного приближения по Чебышеву. Приводятся расчетные графики для определения параметров схемы по заданным техническим требованиям к прибору.

коэффициента сопротивления моментных пружинок. Значение сопротивления пружинок включено в  $r_d$ .

Кроме того, полагаем пока температурный коэффициент постоянного магнита равным температурному коэффициенту упругости пружинок, т.е. считаем температурный коэффициент прибора равным температурному коэффициенту схемы.

Ниже показано, каким образом учитываются эти дополнительные влияния.

Ток в рамке прибора

$$i = \frac{U}{Z_{12}} = \frac{U}{R + (r_t + r_d) \left( 1 + \frac{R}{R_t} \right)}, \quad (1)$$

где  $Z_{12}$  — взаимное сопротивление ветвей питания и рамки.

При изменении температуры прибора на  $\Delta t$  от отношения к температуре градуировки имеем:

$$i + \Delta i = \frac{U}{Z_{12} + \Delta Z_{12}} = \frac{U}{R + [r_t (1 + \alpha \Delta t) + r_d] \left[ 1 + \frac{R}{R_t (1 + \beta \Delta t)} \right]}.$$

Относительная погрешность показаний прибора

$$\epsilon = \frac{\Delta i}{i} \approx - \frac{\Delta Z_{12}}{Z_{12}}$$

с точностью до  $\epsilon$ . После подстановок получаем:

$$\epsilon = \frac{\alpha \beta r_t (\theta - \Delta t) \Delta t}{Z_{12} (1 + \beta \Delta t)}, \quad (2)$$

где

$$\theta = \frac{R}{R_t} \left( \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right) - 1 \quad (3)$$

есть изменение температуры прибора, при котором погрешность снова обращается в нуль. Выражение (3) называют условием компенсации;  $\theta$  — смещение точки компенсации. Значения  $\alpha$ ,  $\beta$  и всех параметров схемы в выражениях (1), (2), (3) указаны для температуры градуировки прибора.

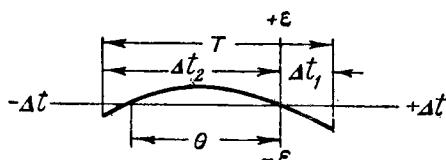


Рис. 2. Температурная погрешность схемы рис. 1.

Кривая относительной погрешности  $\epsilon$  в зависимости от  $\Delta t$  близка к параболе (рис. 2), отклонение от которой определяется наличием знаменателя  $1 + \beta \Delta t$ .

Коэффициент полезного действия схемы

$$\eta = \frac{i^2 r_t}{U^2} = \frac{Z_{11} r_t}{Z_{12}^2}. \quad (4)$$

необходимо сделать максимальным при условии, что температурные погрешности не выйдут за пределы заданных. Здесь входное сопротивление

$$Z_{11} = R + \frac{(r_t + r_\theta) R_t}{r_t + r_\theta + R_t} = Z_{12} \frac{R_t}{r_t + r_\theta + R_t}. \quad (5)$$

Эта задача может решаться двояко:

1. Задана наибольшая допустимая погрешность  $\epsilon$  при данном отклонении  $\Delta t$  температуры прибора от температуры его градуировки в соответствии, например, с классом прибора (по ГОСТ 1845-42)<sup>1</sup>. Такое условие согласно (3) является дополнительной связью между переменными в выражении (1) для к. п. д. Необходимо определить значения параметров схемы, дающие максимум к. п. д. при наличии этой дополнительной связи.

2. На расположение кривой погрешностей в заданном диапазоне изменения температуры накладывается требование минимальной погрешности во всем диапазоне. Это требование может быть выражено способами, даваемыми теорией наилучшего равномерного приближения по Чебышеву.

Применение одного или другого метода определяется техническими требованиями к прибору.

**Определение оптимальных параметров схемы из условия заданной погрешности.** Требуется найти максимум к. п. д. при заданных входном сопротивлении  $Z_{11}$  и погрешности  $\epsilon$  (при  $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ ), связанных с параметрами схемы уравнениями (2) и (5).

Для удобства расчетов введем вспомогательные параметры

$$\alpha' = \frac{r_t}{r_t + r_\theta}, \quad (6)$$

$$p = \frac{Z_{11}}{R_t}, \quad (7)$$

$$q = \frac{r_t + r_\theta}{r_t + r_\theta + R_t}, \quad (8)$$

через которые вместе с выражением (5) для  $Z_{11}$  однозначно определяются сопротивления схемы

<sup>1</sup> Рассматривается участок кривой (рис. 2), где погрешность изменяется наиболее быстро.

$r_t, r_\theta, R$  и  $R_t$ . Выражая через эти параметры  $Z_{12}, \theta, \epsilon$  и  $\eta$ , имеем:

$$Z_{12} = \frac{Z_{11}}{1 - q}, \quad (9)$$

$$\theta = \frac{(p - q) \left( \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right) - 1}{\beta}, \quad (10)$$

$$\epsilon = \frac{\alpha' q}{p} \left[ (p - q) \left( \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right) - (1 + \beta \Delta t) \right] \frac{\Delta t}{1 + \beta \Delta t} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{\alpha' q (1 - q)}{\alpha p}. \quad (12)$$

Для отыскания относительного максимума  $\eta$  по переменным  $\alpha', p, q$  при заданном  $\epsilon$  воспользуемся методом постоянных множителей Лагранжа.

Составляем вспомогательную функцию

$$\Phi = \eta + \lambda [f(\alpha', p, q) - \epsilon],$$

где  $f(\alpha', p, q)$  — правая часть выражения (11) для  $\epsilon$ ;  $\lambda$  — произвольная постоянная.

Приравнивая нулю частные производные  $\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha'}$ ,  $\frac{\partial \Phi}{\partial p}$ ,  $\frac{\partial \Phi}{\partial q}$  и исключая из полученных уравнений  $\lambda$ , находим:

$$p = \frac{\beta}{\alpha'} q, \quad (13)$$

$$q = \frac{\left( \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right)^2 - (1 + \beta \Delta t)}{\left( \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right) \frac{\beta}{\alpha'}}. \quad (14)$$

Подставляя  $p$  и  $q$  в выражение для погрешности (11), находим однозначную связь  $\alpha'$  с заданной погрешностью  $\epsilon$  при изменении температуры на  $\Delta t$

$$\epsilon = \frac{\left( \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right)^3 - \left( 2 \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right) (1 + \beta \Delta t)}{\left( \frac{\beta}{\alpha'} \right)^3} \frac{\beta \Delta t}{1 + \beta \Delta t}. \quad (15)$$

На рис. 3 дан график зависимости  $\frac{\beta}{\alpha'}$  от заданной погрешности при изменении температуры

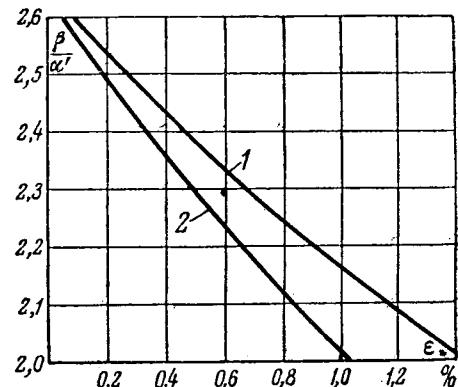


Рис. 3. Зависимость  $\frac{\beta}{\alpha'}$  от погрешности  $\epsilon$  при изменении температуры на  $10^\circ\text{C}$ . 1 —  $R_t\text{Ni}$ ; 2 —  $R_t\text{Cu}$ .

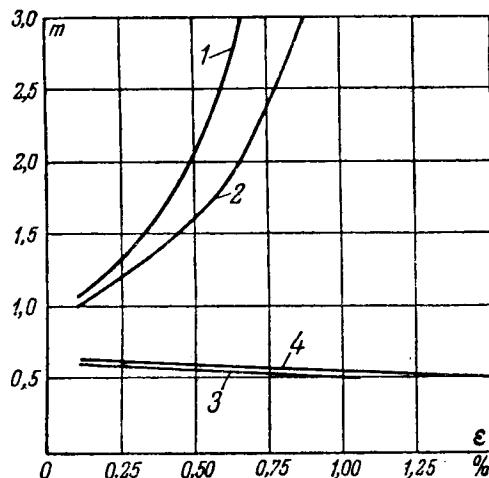


Рис. 4. Оптимальные значения параметров схемы (рис. 1) при заданном входном сопротивлении прибора в зависимости от заданной погрешности  $\epsilon$  при изменении температуры на  $10^\circ\text{C}$ .

Для кривых 1 и 2  $m = \frac{R_t}{Z_{11}}$ ; для 3 и 4  $m = \frac{R}{Z_{11}} \approx \frac{r_t + r_\partial}{Z_{11}}$ .

Кривые 1 и 3 соответствуют шунту из меди, а 2 и 4 — из никеля.

на  $10^\circ\text{C}$ . и при  $\beta = 4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  (медный шунт) и  $\beta = 5,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  (никелевый шунт).

Через  $\frac{\beta}{\alpha'}$  и  $Z_{11}$  могут быть выражены все элементы схемы:

$$\frac{R}{Z_{11}} = 1 - \frac{\alpha'}{\beta}, \quad (16)$$

$$\frac{r_\partial + r_t}{Z_{11}} = \frac{\frac{\beta}{\alpha'} - 1}{\frac{\beta}{\alpha'} + \beta \Delta t} \approx 1 - \frac{\alpha'}{\beta}, \quad (17)$$

т. е.

$$R \approx r_\partial + r_t,$$

$$\frac{r_t}{Z_{11}} = \frac{\alpha'}{\alpha} \frac{\frac{\beta}{\alpha'} - 1}{\frac{\beta}{\alpha'} + \beta \Delta t} \approx \frac{\alpha'}{\alpha} \left(1 - \frac{\alpha'}{\beta}\right), \quad (18)$$

$$\frac{R_t}{Z_{11}} = \frac{\frac{\beta}{\alpha'} - 1}{\left(\frac{\beta}{\alpha'}\right)^2 - 2 \frac{\beta}{\alpha'} - \beta \Delta t}, \quad (19)$$

Максимальный к. п. д. схемы

$$\eta_{\max} = \frac{\beta}{\alpha} \frac{\frac{\beta}{\alpha'} + \beta \Delta t}{\left(\frac{\beta}{\alpha'} - 1\right) \left(\frac{\beta}{\alpha'}\right)^2} \approx \frac{\beta}{\alpha} \frac{1}{\left(\frac{\beta}{\alpha'} - 1\right) \left(\frac{\beta}{\alpha'}\right)^2}. \quad (20)$$

Наименьшее значение  $\frac{\beta}{\alpha'}$  в уравнении (20) определяется обращением в нуль знаменателя выражения (19) для  $R_t$ . Значение сопротивления

шунта  $R_t$  при этом обращается в бесконечность, т. е. последовательно-параллельная схема вырождается в последовательную. Наименьшее значение  $\frac{\beta}{\alpha'}$

$$\left(\frac{\beta}{\alpha'}\right)_{\min} = 1 + \sqrt{1 + \beta \Delta t} \approx 2.$$

Максимум к. п. д. существует в последовательно-параллельной схеме только при значениях  $\frac{\beta}{\alpha'} > \left(\frac{\beta}{\alpha'}\right)_{\min}$ . Наибольшее возможное значение этого максимума получается подстановкой  $\left(\frac{\beta}{\alpha'}\right)_{\min}$  в (20)

$$(\eta_{\max})_{\max} \approx 0,25 \frac{\beta}{\alpha}.$$

Подставляя значение  $\left(\frac{\beta}{\alpha'}\right)_{\min}$  в (15), находим критическое значение погрешности:

$$|\epsilon_{\text{крит}}| = \frac{\beta \Delta t}{(1 + \sqrt{1 + \beta \Delta t})^2} \approx 0,25 \beta \Delta t.$$

Использование последовательно-параллельной схемы целесообразно, пока допустимая погрешность  $|\epsilon_{\text{доп}}| < |\epsilon_{\text{крит}}|$ . Когда  $|\epsilon_{\text{доп}}| \geq |\epsilon_{\text{крит}}|$ , применение последовательно-параллельной схемы теряет смысл.

На рис. 4 даны графики для определения значений сопротивления элементов схемы, на рис. 5 показана зависимость к. п. д. от заданной погрешности. На рис. 5 также показана зависимость к. п. д. от заданной погрешности у последовательной схемы, где<sup>2</sup>

$$\eta = \frac{r_t}{r_t + r_\partial} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\epsilon}{\alpha \Delta t}.$$

Для учета температурных коэффициентов постоянного магнита и упругости пружинок достаточно рассматривать результирующую температурную погрешность прибора, как алгебраическую сумму температурных погрешностей, вызываемых по отдельности изменением сопротивлений схемы, магнитного потока и упругости пружинок. Таким образом,

$$\epsilon_{\text{рез}} = \epsilon_s + \epsilon_m,$$

где  $\epsilon_s$  — температурная погрешность схемы;  $\epsilon_m$  — температурная погрешность механизма (применимая терминологию В. О. Арутюнова [Л. 6]), т. е. температурная погрешность, вызванная изменением магнитного потока и упругости пружинок. Температурная погрешность механизма колебается в пределах  $(0,1 \dots 0,3)\%$  на  $10^\circ\text{C}$ . У пра-

<sup>2</sup> Из рис. 5 видно, что последовательная схема дает практически одинаковый к. п. д. с последовательно-параллельной, уже когда  $\epsilon_{\text{доп}} > 0,7\%$  при  $\beta = 4 \times 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  и когда  $\epsilon_{\text{доп}} > 1\%$  при  $\beta = 5,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ . Учитывая большую сложность последовательно-параллельной схемы, нужно считать эти значения погрешностей практическими пределами ее применения.

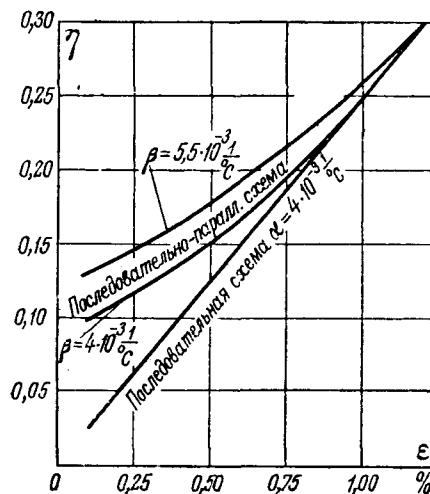


Рис. 5. Максимальное значение к. п. д. схемы в зависимости от заданной погрешности  $\epsilon$  при изменении температуры на  $10^\circ\text{C}$ .

вильно скомпенсированного прибора знаки  $\epsilon_s$  и  $\epsilon_m$  при положительных  $\Delta t$  противоположны и для учета  $\epsilon_m$  достаточно допустимую погрешность на столько же увеличить, т. е. вести расчет, исходя из заданной температурной погрешности схемы,

$$\epsilon_s = |\epsilon_{pes}| + |\epsilon_m|. \quad (21)$$

Учет температурного коэффициента магнита и упругости пружинок позволяет для приборов высокого класса заметно повысить к. п. д. схемы.

В приборах малого входного сопротивления серьезное влияние начинает оказывать температурный коэффициент сопротивления пружинок, который в среднем можно полагать  $\gamma = 1 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ . Влияние это показано впервые Я. С. Авербухом [Л. 1], который, однако, вследствие произвольного выбора некоторых параметров и, в частности, произвольной фиксации точки компенсации  $\theta$  получил чрезмерно низкие значения к. п. д. В действительности положение точки компенсации, являющееся функцией параметров, при оптимальном их выборе однозначно определяется заданной погрешностью и температурным коэффициентом шунта.

Для учета температурного коэффициента пружинок следовало бы рассматривать максимум функции

$$\eta' = \frac{(r_t - r') Z_{11}}{Z_{12}^2}, \quad (22)$$

где  $r'$  — переменная часть сопротивления пружинок  $r_{np}$ , приведенная к температурному коэффициенту рамки,

$$r' = \frac{\gamma}{\alpha} r_{np}.$$

Однако ввиду того, что значение  $\eta$  вблизи максимума мало изменяется даже при больших изменениях параметров схемы, вполне доста-

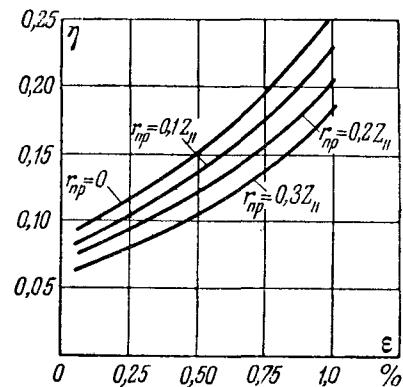


Рис. 6. Максимальное значение к. п. д. с учетом температурного коэффициента сопротивления пружинок ( $R_{tCu}$ ).

точно, используя вышеприведенную методику, определять прежним способом  $r_t$ , включая в него переменную часть сопротивления пружинок  $r'$ . Таким образом, сопротивление самой рамки получается меньшим; соответственно снижается и к. п. д. схемы:

$$\eta'_{max} \approx \frac{\beta}{\alpha} \frac{1}{\left(\frac{\beta}{\alpha'} - 1\right) \left(\frac{\beta}{\alpha'}\right)^2} - \frac{\gamma}{\alpha} \frac{r_{np}}{Z_{11}} \frac{1}{\left(\frac{\beta}{\alpha'} - 1\right)^2} = \\ = \eta_{max} \left[ 1 - \frac{\gamma}{\beta} \frac{r_{np}}{Z_{11}} \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha'}\right)^2}{\frac{\beta}{\alpha'} - 1} \right]. \quad (23)$$

Значение к. п. д. в зависимости от заданной погрешности для разных отношений сопротивления пружинок к входному сопротивлению прибора  $\frac{r_{np}}{Z_{11}}$  показано на рис. 6 (для медного шунта).

На рис. 7 показаны кривые распределения погрешностей в функции температуры при оптимальном выборе параметров и при разных значениях заданной погрешности на  $10^\circ\text{C}$  для

$$\beta = 4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}.$$

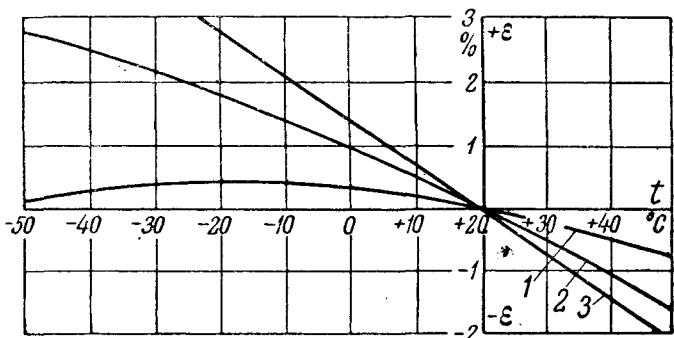


Рис. 7. Температурная погрешность схемы  $\epsilon$  при максимальном к. п. д. ( $R_{tCu}$ ). 1 — заданная погрешность схемы при изменении температуры на  $10^\circ\text{C}$ , равная  $0.2\%$ ; 2 — то же  $0.5\%$ ; 3 — то же  $0.7\%$ .

**Определение оптимальных параметров схемы из условия наилучшего равномерного приближения по Чебышеву.** Плодотворные идеи великого русского ученого П. Л. Чебышева с успехом используются в теории механизмов, теории фильтров и других областях. В. Н. Мильштейн предложил использовать методы Чебышева для компенсации частотных погрешностей приборов [Л. 8].

Методом Чебышева можно найти условия наименьшего уклонения от нуля кривой температурных погрешностей.

Не приводя здесь необходимых сведений из теории наилучшего приближения функций по Чебышеву [Л. 7], укажем лишь, что условия наилучшего равномерного приближения определяют единственным образом расположение кривой температурных погрешностей, а именно:

1. Для функции, представленной выражением (3), кривая погрешностей должна в заданном диапазоне изменения температур  $T = \Delta t_1 - \Delta t_2$  дважды пересечь ось абсцисс.

2. Абсолютные значения погрешностей в начале и конце диапазона, а также в точке, где кривая достигает максимума, должны быть равны.

Если для простоты считать кривую погрешностей параболой, т. е. в знаменателе выражения (3) полагать  $\beta \Delta t \ll 1$ , то эти условия сводятся к следующим:

1. Кривая погрешностей (рис. 2) должна быть симметрична относительно оси, проходящей через середину заданного диапазона.

2. Расстояние между точками, в которых погрешность обращается в нуль,

$$|\theta| = \frac{T}{\sqrt{2}}. \quad (24)$$

3. Абсолютные значения погрешностей на концах и в середине диапазона одинаковы и равны

$$|\epsilon|_{\max} = \frac{\alpha \beta r_t}{Z_{12}} \frac{T^2}{8}. \quad (25)$$

Точки, где погрешности обращаются в нуль, могут являться температурами градуировки, если ее производить без поправок. При любой другой температуре градуировка должна производиться с соответствующими поправками.

Условие компенсации (3) при выполнении требования (24) принимает вид:

$$\frac{T}{\sqrt{2}} = \frac{1 - R_t}{\beta} \left( \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right), \quad (26)$$

предполагая, что значения всех параметров взяты для температуры, когда погрешность обращается в нуль с правой стороны диапазона.

Уравнение (26) представляет собою связь между четырьмя параметрами последовательно-параллельной схемы, вытекающую из условий Чебышева. Второй связью является заданное входное сопротивление прибора  $Z_{11}$ , выражаемое уравнением (5). Величину  $\epsilon_{\max}$  можно рассмат-

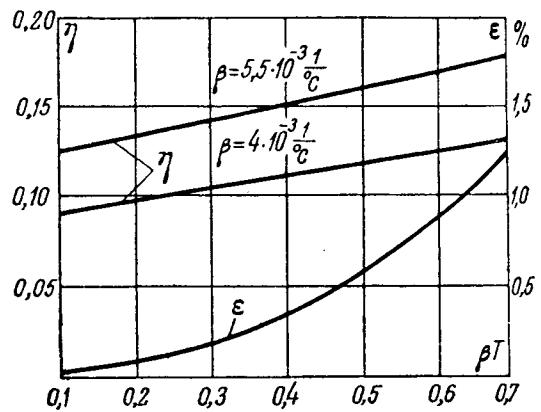


Рис. 8. Максимальный к. п. д. схемы и максимальная погрешность при распределении погрешностей по Чебышеву.

ривать как переменный параметр, определяемый значениями варьируемых сопротивлений схемы.

Выберем в качестве новых независимых переменных величины температурного коэффициента цепи рамки  $\alpha'$  и максимальной погрешности  $\epsilon_{\max}$  согласно выражению (25).

Производя замену переменных, приходим к выражению для к. п. д.

$$\eta = \frac{8\epsilon_{\max}}{\alpha \beta T^2} \left[ 1 - \frac{1 - \frac{\beta T}{\sqrt{2}}}{\left( \frac{\alpha' \beta T^2}{8\epsilon_{\max}} - 1 \right) \left( \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right)} \right], \quad (27)$$

где заданными величинами являются  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $T$  а варьируются независимые переменные  $\alpha'$  и  $\epsilon_{\max}$ .

Приравнивая нулю частные производные

$$\frac{\partial \eta}{\partial \alpha'}, \quad \frac{\partial \eta}{\partial \epsilon_{\max}},$$

находим:

$$\alpha' = \frac{\sqrt{8\epsilon_{\max}}}{T}, \quad (28)$$

$$1 - \frac{\beta T}{\sqrt{2}} = \frac{\left( \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right)}{2 \frac{\beta}{\alpha'} - 1}. \quad (29)$$

Значение максимума  $\eta$  при подстановке в (27) условий (28) и (29)

$$\eta_{\max} = \frac{\beta}{\alpha} \frac{1}{\frac{\beta}{\alpha'} \left( 2 \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right)} = \frac{\alpha'^2}{\alpha (2\beta - \alpha')}. \quad (30)$$

Значение  $\epsilon_{\max}$ , соответствующее оптимальному к. п. д., находим из (28):

$$\epsilon_{\max} = \frac{\alpha'^2 T^2}{8} = \frac{1}{8} \left( \frac{\beta T}{\alpha'} \right)^2. \quad (31)$$

Хотя погрешность растет с увеличением (рис. 8), но даже при никелевом шунте

$$\beta = 5,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$$

при диапазоне  $T = 25^\circ$  имеем  $\epsilon_{\max} < 0,06\%$ , а при  $T = 110^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon_{\max} < 1,2\%$  во всем диапазоне изменения температуры, что вполне приемлемо для всех практических задач.

Однозначно определяются также значения всех параметров схемы, обеспечивающие максимум к. п. д. при минимальной погрешности на диапазоне.

Находим:

$$\frac{R}{Z_{11}} = 1 - \frac{\alpha'}{\beta}, \quad (32)$$

$$\frac{r_t}{Z_{11}} = \frac{\beta}{\alpha} \frac{2 - \frac{\alpha'}{\beta}}{\left(\frac{\beta}{\alpha'}\right)^2}, \quad (33)$$

$$\frac{R}{R_t} = \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha'} - 1\right)^2}{2 \frac{\beta}{\alpha'} - 1}. \quad (34)$$

Определив из (29)  $\frac{\beta}{\alpha'}$ , находим все искомые параметры из (32), (33) и (34).

На рис. 8 даны графики  $\eta_{\max}$  и  $\epsilon_{\max}$  в зависимости от  $\beta\alpha'$ .

Заметим, что максимальный к. п. д. растет с увеличением  $\theta$ . Поэтому, произвольно совмещая точку компенсации с точкой градуировки, как это делает, например, Регер [Л. 2], полагая  $\theta = 0$ , мы при больших значениях  $T$  не только значительно увеличиваем погрешности, но и снижаем к. п. д. схемы по сравнению с получающимся при расположении кривой погрешностей по Чебышеву.

Для учета влияния температурного коэффициента механизма при определении условий наилучшего приближения, по Чебышеву, необходимо установить условие компенсации из одновременного рассмотрения влияний изменения параметров схемы и механизма и расчет вести, исходя из этого уточненного условия компенсации в соответствии с вышеизложенным.

Учет температурного коэффициента сопротивления пружинок может быть произведен так же, как и выше.

**Заключение.** Полученные результаты позволяют сделать некоторые общие выводы о выборе оптимальных параметров последовательно-параллельной схемы в зависимости от условий ее применения.

1. Если схема проектируется, исходя из заданного значения погрешности при определенном изменении температуры прибора от принятой точки градуировки, то максимальный к. п. д. является однозначной функцией заданной погрешности.

2. Если задачей проектирования является получение достаточно малых погрешностей на всем диапазоне изменения температуры прибора, то целесообразно потребовать расположения кривой погрешностей по Чебышеву.

3. Выбор параметров схемы производился из условия заданного входного сопротивления прибора. Заданные условия могут быть иными. За-

данным может быть последовательное сопротивление  $R$ , в качестве которого, например, используется иногда сопротивление термопары; если необходимо осуществить компенсацию у готового прибора, то приходится считать заданными сопротивление рамки и ток полного отклонения. Можно указать и другие практически возможные постановки задачи.

Во всех этих случаях изложенная выше общая методика выбора оптимальных параметров остается без изменений. Однако соотношения между параметрами, обеспечивающие максимальный к. п. д. схемы при различных заданных условиях вообще получаются разными.

**Приложение.** Пример. Определим параметры последовательно-параллельной схемы для милливольтметра класса 0,2 (по ГОСТ 1845-42) с входным сопротивлением 10 ом. Ориентировочное значение сопротивления пружинок 1 ом, температурный коэффициент механизма (разность температурных коэффициентов постоянного магнита и упругости пружинок)  $\epsilon_m = 0,2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

Допустимая температурная погрешность схемы

$$\epsilon_s < |\epsilon_{pes}| + |\epsilon_m| = 0,2 + 0,2 = 0,4\% \text{ на } 10^\circ\text{C}.$$

Задаемся  $\epsilon_s = 0,35\%$  на  $10^\circ\text{C}$ . Располагая никелевым шунтом ( $\beta = 5,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ ), находим из рис. 3:

$$\frac{\beta}{\alpha'} = 2,47, \text{ откуда } \alpha' = \frac{\beta}{2,47} = 2,23 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}.$$

Параметры схемы из рис. 4:

$$R = 0,6 Z_{11} = 6 \text{ ом}, R_t = 1,3 Z_{11} = 13 \text{ ом}, r_t + r_\partial = R = 6 \text{ ом}$$

$$r_t = \frac{\alpha'}{\alpha} (r_t + r_\partial) = 6 \frac{2,23 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 3,35 \text{ ом},$$

$$r_\partial = 6 - 3,35 = 2,65 \text{ ом.}$$

Переменная  $r'$  и постоянная  $r''$  — части сопротивления пружинок  $r_{np}$  — включены соответственно в сопротивления  $r_t$  и  $r_\partial$ . Таким образом, сопротивление рамки без пружинок

$$r' = r_t - r' = r_t - \frac{1}{\alpha} r_{np} = 3,35 - 1 \frac{1 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 3,1 \text{ ом.}$$

Добавочное сопротивление без пружинок (сопротивление катушки)

$$r'_\partial = r_\partial - r'' = r_\partial - \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) r_{np} = \\ = 2,65 - 1 \left(1 - \frac{1 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}}\right) = 1,9 \text{ ом.}$$

Коэффициент полезного действия схемы из (23) для

$$\frac{r_{np}}{Z_{11}} = 0,1$$

$$\eta_{\max} \approx 0,15$$

(по методу, изложенному в [Л. 1], получаем  $\eta = 0,06 \dots 0,08$ ). Для проверки результатов находим: входное сопротивление

$$Z_{11} = R + \frac{(r_t + r_\partial) R_t}{r_t + r_\partial + R_t} = 6 + \frac{6 \cdot 13}{6 + 13} = 10,1 \text{ ом};$$

взаимное сопротивление

$$Z_{12} = R + (r_t + r_d) \left(1 + \frac{R}{R_t}\right) = \\ = 6 + 6 \left(1 + \frac{6}{13}\right) = 14,75 \text{ ом};$$

точка компенсации

$$\theta = \frac{\frac{R}{R_t} \left( \frac{\beta}{\alpha'} - 1 \right) - 1}{\beta} = \frac{\frac{6}{13} (2,47 - 1) - 1}{5,5 \cdot 10^{-3}} = -58^\circ.$$

Температурная погрешность схемы при изменении температуры на  $+10^\circ$

$$\epsilon_s = \frac{\alpha r_t (\theta - \Delta t) \Delta t}{Z_{12} (1 + \beta \Delta t)} = \\ = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,35}{14,75 \cdot 1,055} (-58 - 10) 10 = -0,32\%.$$

Результирующая погрешность прибора

$$\epsilon_{\text{рез}} = \epsilon_s + \epsilon_m = -0,32 + 0,2 = -0,12\% \text{ на } 10^\circ \text{ С,}$$

что удовлетворяет заданию.

Коэффициент полезного действия последовательной схемы для тех же условий

$$\eta = \frac{\epsilon}{\alpha \beta t} - \frac{r'}{Z_{11}} = \frac{0,35 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,25}{10} = 6,2\%,$$

т. е. почти в 2,5 раза меньше, чем у последовательно-параллельной схемы.

### Литература

1. Я. С. Авербух. Милливольтметры с температурной компенсацией по Свинберну. Известия электропромышленности слабого тока, № 4, 1939.

2. H. Rehig. Kompensation des Temperaturfehlers von Gleichstrom-Instrumenten. Archiv für Technische Messen, № 94, 95, 1939.

3. Н. Н. Пономарев. Теория, расчет и конструирование электроизмерительных приборов. Ленгиз, 1943.

4. В. О. Арутюнов. Конструкция и расчет электроизмерительных приборов. Госэнергоиздат, 1949.

5. Р. Р. Харченко. О расчете магнито-электрических измерителей с температурной компенсацией по Свинберну. Измерительная техника, № 1, 1941.

6. В. О. Арутюнов. О расчете погрешностей электроизмерительных приборов. Электричество, № 8, 1949.

7. П. Л. Чебышев. Вопросы о наименьших величинах, связанных с приближенным представлением функций. Собрание сочинений, т. II, стр. 151—235, АН СССР, 1947.

8. В. Н. Мильштейн. Частотная компенсация вольтметров переменного тока. Электричество, № 10, 1952.

[17. 1. 1951]



## Из опыта работы

### Опыт эксплуатации новых быстродействующих выключателей на тяговых подстанциях

Инж. Б. С. ЗУБРИЦКИЙ

Свердловск

В июне 1951 г. на одной из тяговых подстанций трамвая для защиты питательной линии был установлен в опытную эксплуатацию новый быстродействующий выключатель типа ВАБ-20 конструкции А. И. Голубева.

Характеристики выключателя следующие: номинальный ток 1 500 а, номинальное напряжение 1 000 в.

Хорошее конструктивное оформление и удовлетворительные результаты опытной эксплуатации выгодно отличают новый быстродействующий выключатель от распространенных на тяговых подстанциях выключателей типа БАОД, БДА и ВАБ-2. К наиболее важным его достоинствам следует отнести: 1) простоту конструкции; 2) отсутствие надобности в постоянном питании удерживающих катушек; 3) исключительное быстродействие (полное время составляет около 0,022 сек., см. ниже рис. 2); 4) возможность регулирования в широких пределах тока уставки; 5) независимость срабатывания от направления тока; 6) возможность при отключении автомата определить причину отключения (к. з. или перегрузка).

Перечисленные качества выключателя типа ВАБ-20 во многом определяются принципом его

Приводятся результаты более чем годичной опытной эксплуатации новых быстродействующих выключателей типа ВАБ-20 системы А. И. Голубева на тяговых подстанциях и дается сравнительная оценка новых автоматов.

действия. Поэтому небезинтересно будет хотя бы вкратце коснуться устройства нового выключателя.

В выключателе от шинопровода *A* (рис. 1) ток попадает на подвижный контакт *4*, так как под действием пружины *8* контакт *4* прижат к неподвижному контакту *12*. Подвижный контакт *4* выполняется в виде шины, проходящей сквозь магнитную систему.

Магнитная система состоит из якоря *11*, жестко связанного с шиной *4*, и неподвижного электромагнита *1*.

Левая сторона электромагнита *1* имеет два полюса, разделенных щелью, в которой шина *4* может свободно двигаться. Правая сторона электромагнита *1* имеет три полюса в форме буквы *Ш*. На среднем полюсе сидит катушка *3*.

При нормальном режиме работы протекающий по шине *4* ток защищаемой цепи создает магнитный поток, притягивающий якорь, однако сила притяжения мала и поэтому не может сильно ослабить давление между контактами *12* и *4*. Магнитная система *1* так рассчитана, а пружина *8* так подобрана, что при допустимых перегрузках давление между контактами не может быть менее

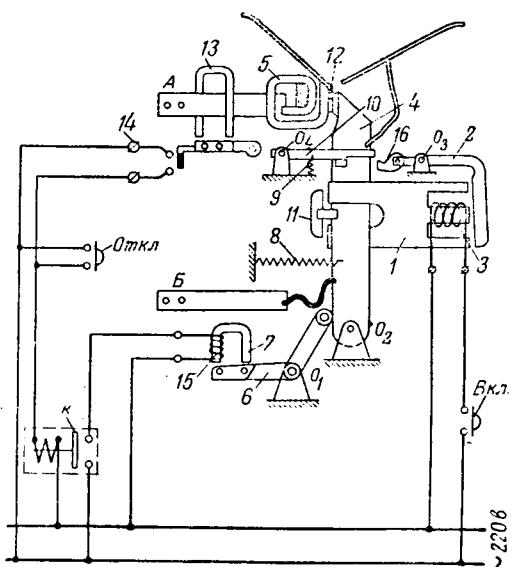


Рис. 1. Принцип действия и устройство быстродействующего выключателя типа ВАБ-20 („вкл“ — кнопка включения, „откл“ — кнопка отключения;  $k$  — контактор).

некоторой величины, определяемой условиями предельной температуры нагрева контактов.

Электромагнит 7 с рычагом якоря 6 и перегрузочное реле 13 позволяют размыкать контакты выключателя, как только ток в его цепи достигнет предельно допускаемой величины, при которой давление уже становится недостаточным по условиям нагрева.

Отключение выключателя происходит в следующей последовательности:

Отрегулированное на заданный ток срабатывания реле перегрузки 13, сидящее на входной шине выключателя, при достижении этого тока срабатывает, его якорь притягивается, а контакты 14 замыкаются, тем самым замыкая цепь катушки 15 электромагнита 7.

Под действием притягивающих усилий электромагнита 7 рычаг 6 этого электромагнита поворачивается по часовой стрелке и один конец этого рычага 6 воздействует на рычаг 4, размыкая контакты выключателя. Обратному смыканию контактов выключателя после исчезновения тока перегрузки препятствует защелка 10.

Для того чтобы включить выключатель вновь, необходимо подать напряжение на катушку 3. При замыкании цепи катушки 3 рычаг якоря 2, притягиваясь к полюсам, повернется вокруг оси вращения  $O$ , ударит левым своим концом по защелке, и контакты выключателя сомкнутся.

В условиях эксплуатации возможен случай, когда к. з. произойдет немедленно после нажатия кнопки «включить» и прежде чем будет отпущена кнопка, а следовательно, прежде чем защелка опустится в рабочее положение. Контактный рычаг вследствие жесткости связи с якорем многократно будет иметь возможность в этом случае включаться и выключаться. Для того чтобы воспрепятствовать этому, иначе говоря, для осуществления свободного расцепления, ударник 16

освобождающий защелку, связан с рычагом якоря 2 Ш-образного электромагнита шарнирно. В силу этого после удара по защелке ударник 16 опускается вниз, не мешая защелке выполнить свое назначение.

Уменьшая или увеличивая зазор между якорем и полюсом электромагнита *13*, можно увеличить или снизить ток, при котором он будет притягиваться и, таким образом, уменьшить ток отключения выключателя. Изменение тока уставки осуществляется указанным способом в довольно широких пределах.

При коротком замыкании в защищаемой цепи ток нарастает с огромной скоростью, исчисляемой миллионами ампер в секунду, и уже спустя 3...4 тысячных доли секунды от начала к. з. достигает значения в десятки тысяч ампер. Сила притяжения якоря электромагнита растет пропорционально квадрату тока, вследствие чего якорь 11 под действием значительных притягивающих электромагнитных сил начинает двигаться с полюсом, а с ним одновременно двигается подвижной контакт 4. Возникающая между размыкающимися контактами дуга под действием катушки магнитного дутья 5 быстро гаснет, к. з. ликвидируется. Подвижный контакт 4, как уже было сказано, не может сомкнуться вновь после обрыва тока, так как его удерживает защелка 10.

Включение выключателя после отключения к. з. осуществляется так же, как и после отключения перегрузки.

По желанию выключатель можно отключить дистанционно. Для этого достаточно нажать кнопку «откл» (рис. 1). В результате будет подано напряжение на катушку 15 электромагнита 7, а это влечет за собой, как ранее уже описывалось, отключение выключателя.

Для быстродействующего выключателя любой системы существует минимальный ток, который еще может быть отключен без чрезмерной затяжки горения дуги в камере. В условиях эксплуатации трамвайной подстанции бывают случаи, когда выключатель может быть отключен кнопкой при токах менее 30 а и дуга не будет погашена.

Во избежание затяжного гашения дуги при отключении весьма малого тока металлические щеки камеры выключателя связаны с полюсами постоянного магнита при соблюдении требуемой полярности. Постоянный магнит создает постоян-

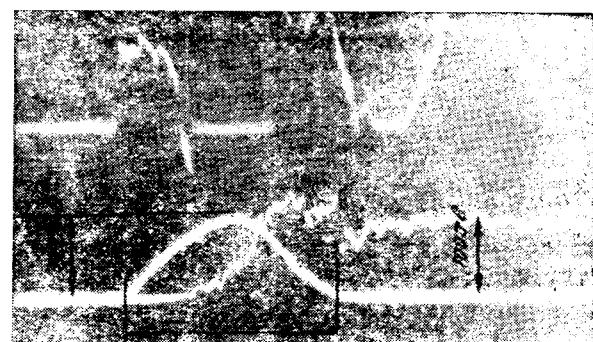


Рис. 2. Осциллограммы процесса отключения к. з. выключателем ВАБ-20.

ную напряженность магнитного поля в зоне контактов и обеспечивает гашение дуги при весьма малых токах (1...2 а).

За первый месяц эксплуатации в выключателе были выявлены и устранены мелкие дефекты сборки. После этого выключатель работает безотказно уже в течение года.

Включение серийного блокера в цепь реле перегрузки позволило устанавливать причину отключения автомата: произошло ли отключение от перегрузки или к. з., ибо при к. з. блокер не успевает выпадать.

В первые 3 мес. эксплуатации выключателя были созданы умышленно тяжелые условия работы. За это время выключатель осуществил более 125 отключений от к. з. и перегрузок. Были случаи, когда за 1 час выключатель производил до 40 отключений от перегрузки и никаких дефектов в работе его не обнаруживалось. Простота конструкции выключателя позволила персоналу подстанции быстро освоить его в условиях эксплуатации.

Высокие эксплуатационные качества выключателя и отсутствие удерживающих катушек, что уменьшает расход электроэнергии на собственные нужды подстанции, убедили нас в необходимости срочного изготовления подобных автоматов для подстанций трамвая своими силами.

Вначале было изготовлено два автомата с корпусами из авиационной фанеры. После удачного и быстрого завершения сборки двух выключателей приступили к изготовлению еще четырех выключателей, но уже с металлическими корпусами.

Изготовленные своими силами выключатели были испытаны и смонтированы на подстанциях трамвая и троллейбуса. Опыт эксплуатации показал, что оба варианта исполнения (корпус из авиационной фанеры и металлический) работают одинаково хорошо.

За период более чем годичной эксплуатации выключателей ВАБ-20 в различных эксплуатационных условиях выявлены дополнительные следующие его качества помимо тех, о которых говорилось ранее:

- 1) высокая надежность работы;
- 2) малые эксплуатационные расходы по содержанию автомата ВАБ-20, которые по сравнению с расходами на автоматы ВАБ-2 или БАОД меньше в 2 раза;
- 3) полная селективность отключений выключателем к. з., о чем свидетельствует тот факт, что за время годичной эксплуатации не было ни одного случая отключения масляного выключателя при срабатывании ВАБ-20;

4) подсчитано, что установка только 10 выключателей ВАБ-20 на тяговых подстанциях трамвая — троллейбуса дает экономию около 40 тыс. руб.;

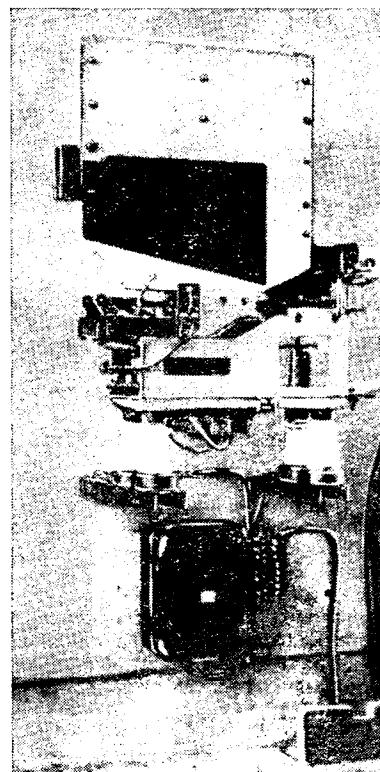


Рис. 3. Внешний вид автомата ВАБ-20.

5) подтверждена четкая и безотказная работа свободного расцепления, что позволило применить простую схему автоматического повторного включения;

6) выявлена большая износостойчивость контактов и отсутствие необходимости ухода за ними, что нельзя сказать в отношении, например, контактов выключателей типа БАОД.

**Выводы.** 1. Учитывая положительный опыт эксплуатации выключателей типа ВАБ-20, есть все основания к тому, чтобы рекомендовать широкое его внедрение на тяговых подстанциях городского электротранспорта.

2. Вопрос создания защиты мощных прокатных электродвигателей, поднятый в статье Б. Я. Привальского (Электричество, № 5, 1951), может быть разрешен созданием выключателя на базе идеи и конструкции выключателя типа ВАБ-20. Если можно спроектировать выключатель ВАБ-20 на номинальный ток 5 000 а при напряжении 1 000 в, то такой выключатель в состоянии будет выполнить работу четырех выключателей типа ВАБ-2 3 000/15. Нет нужды говорить о том, в какой мере широкое внедрение ВАБ-20 способствовало бы совершенствованию защиты преобразовательных установок, упрощению ныне существующих схем и снижению эксплуатационных и капитальных затрат на оборудование подстанций.

## Работы Б. С. Якоби в области химических источников тока

На первом месте среди электрохимических работ выдающегося русского физика и электротехника академика Бориса Семеновича Якоби (21.9.1801—10.3.1874) стоит открытие гальванопластики, положившее начало развитию прикладной электрохимии. Однако открытие гальванопластики было хотя и крупнейшим, но не единственным достижением Якоби в области электрохимии. Велики его заслуги и в развитии химических источников тока. Эти два цикла работ Якоби были тесно между собой связаны; как известно, именно наблюдения над медноцинковым элементом и привели Якоби к изучению процесса электроосаждения меди.

Толчок к появлению первой работы Якоби в области источников тока [Л. 1] дала дискуссия вокруг так называемой кислородной цепи Беккереля. Беккерель описал в 1835 г. [Л. 2] гальванический элемент, состоящий из двух платиновых электродов, из которых один соприкасался с концентрированной азотной кислотой, другой — с концентрированным раствором едкого кали; обе жидкости были разделены глиняной диафрагмой. Беккерель предполагал, что реакцией, обеспечивающей возникновение тока в этом элементе, является нейтрализация кислоты щелочью, при соприкосновении которых кислота заряжается положительно, а щелочь — отрицательно. Взгляды Беккереля подверглись критике со стороны Мора. Мор, ссылаясь на опыты Фарадея, выражал сомнение в возможности возникновения тока при соединении кислоты со щелочью. Мор указывает, что цель, аналогичная цепи Беккереля, в которой, однако, вместо азотной кислоты взята серная, не обнаруживает гальванического действия. Работа Мора [Л. 3] вызвала резкий ответ Якоби. Якоби подтвердил опыты Беккереля и подверг тщательной проверке наблюдение, согласно которому при работе цепи Беккереля на ее отрицательном полюсе (т. е. на платине, погруженной в щелочь) выделяется газообразный кислород.

Как мы сейчас знаем, утверждения Беккереля были лишь частично правильны. Можно, действительно, построить цепь, в которой реакция нейтрализации кислоты щелочью служила бы источником электрической энергии. Однако разность потенциалов, наблюдаемая между электродами такой цепи, возникает не в месте соприкосновения кислоты и щелочи; она определяется тем, что при соприкосновении платинового электрода с кислым раствором он заряжается более положительно, чем при соприкосновении со щелочным. В этом смысле механизм действия цепи Беккереля впервые был правильно истолкован современником Якоби русским академиком Э. Х. Ленцем (12.2.1804—10.2.1865), созвавшим его с «модифицирующим действием кислоты и щелочи на платиновые пластинки». Кроме того, суммарный процесс в цепи Беккереля не заключается просто в нейтрализации азотной кислоты щелочью с получением соответствующей соли — он сопровождается одновременным восстановлением с выделением свободного кислорода на другом электроде.

Вопросы эти, имевшие большое значение для теории гальванических цепей, однако, не надолго остановили внимание Якоби. Гальванская цель интересовала Якоби как практический источник тока, который можно было бы использовать в сочетании с электродвигателем, и он обратился к наиболее постоянным и эффективным цепям и в первую очередь к медноцинковому элементу, в котором он полагал найти решение поставленной задачи. В письме к Ленцу «О пользе камерного столба»<sup>1</sup> он говорит: «Для успеха моих усилий привести электромагнетизм к практическому использованию, гальванская цель является, конечно, жизненным вопросом, который теперь, как мне кажется, успешно разрешен...» [Л. 4].

Хотя Якоби и ставил себе совершенно определенные практические задачи, предложения его, относящиеся к химическим источникам тока, свидетельствуют о глубоком продумывании механизма их действия, в понимании кото-

рого он значительно опередил своих современников. Наличие связи между возможностью получения электрического тока из гальванической цепи и протеканием в ней химической реакции было ясно многим ученым во времена Якоби. Впервые указал на нее Риттер; особенно четко связь эта была сформулирована Фарадеем. Однако в вопросе о том, каким образом должна быть составлена гальваническая цепь для того, чтобы эта химическая реакция была рационально использована, ни в работах Риттера, ни в работах Фарадея не было необходимой ясности.

Ценный вклад в исследование этого вопроса внес Борис Семенович Якоби. Сообщения Якоби изложены им в руководстве 1840 г. «Гальванопластика или способ по данным образцам производить медные изделия из медных растворов с помощью гальванизма» [Л. 5]. Якоби разбирает сначала явления, происходящие в элементе, составленном из медной и цинковой пластинок, погруженных в серную кислоту.

«Простая цинковая пластинка и без содействия меди растворяется в кислоте, и всем известно, что это приписывают процессу химическому. Здесь вода, которой кислота была разведена, разлагается посредством цинка на составные свои части — водород и кислород. Последний соединяется с цинком и заставляет его растворяться в серной кислоте, образуя с нею цинковый купорос. Но первый, т. е. водород, делается свободным и может отделяться. То же самое происходит и при гальваническом действии, но с тою разницей, что составные части воды появляются не вместе у одной и той же пластинки, но отдельно, таким образом, что кислород, как и в первом случае, поглощается цинковой пластинкой, а водород появляется на поверхности медной пластинки, и так как с нею соединиться не может, то и отделяется в свободном состоянии».

Если цинковую пластинку амальгамировать, то прямое воздействие кислоты на нее прекращается, и водород на ней не выделяется; однако, если такую «нарученную» пластинку погрузить вместе с медной пластинкой в кислоту, соединив их проволокой, то по проволоке потечет ток, на медной пластинке будет выделяться водород, а цинковая пластинка будет растворяться в кислоте.

«Опытами доказано, что сила таковых действий (т. е. действий гальванического тока — А. Ф.) находится в точнейшем отношении с количеством водорода, отделяющегося у медной пластинки. Количество же водорода, отделяющегося у цинка, несколько не служит к увеличению гальванической силы; напротив того, оно еще некоторым образом ослабляет эту силу. Если в состав гальванического столба будет входить, вместо нарученного цинка, обыкновенный цинк, то здесь будет происходить сложное действие; цинк будет растворяться, и помощью химического, и помощью гальванического процессов. Но сильное испарение и скорое растворение цинка, здесь происходящие, отнюдь не должны быть принимаемы за меру силы, ибо то только количество цинка соответствует произведенной гальванической силе, которое растворяется помощью соединения меди с цинком; количество же цинка, само по себе растворившееся, здесь никакого участия не принимает, а потому и может быть почитаемо совершенно потерянным, по крайней мере относительно гальванического действия, которое произвести желают».

Тот факт, что непосредственного взаимодействия цинка с кислотой совершенно не нужно, приводит Якоби к важному выводу о возможности замены кислоты, соприкасающейся с цинком, нейтральным раствором: «...если вместо кислот будут взяты растворы солей, например, поваренной, глауберовой соли, нашатыря и т. п., в таком случае цинковая пластинка, хотя бы и ненарученная, сама по себе не претерпевает никакого изменения, и может иметь потерю в весе тогда только, когда будет соединена с медной пластинкою. И эта потеря в весе будет находиться в прямом сопротивлении с количеством водорода, отделяющегося у медной пластинки, или с произведенной гальваническою силою».

Использование нейтрального электролита позволяет, таким образом, отказаться от амальгамирования цинкового электрода. Из рассуждений Якоби с полной опреде-

<sup>1</sup> Якоби пользуется этим термином (Kamfersäule) для обозначения медноцинковой цепи, которая в отличие от столба Вольты была разделена пористой перегородкой на два отделения (камеры).

ленностью следует, что раствор у отрицательного полюса может и не быть кислотой, так как выделение водорода у этого электрода не только бесполезно, но и вредно. Этот важный вывод Якоби применил к медноцинковому элементу с двумя электролитами. Причины, заставившие его перейти к таким элементам, указаны в названном выше его руководстве: «... гальванические снаряды, о которых говорим, состоящие из цинка, меди и кислоты, не могут быть с пользою употреблены для технических или многих учёных пред назначений, потому что они в действии своем весьма непостоянны, и именно сила их после кратковременного употребления уже значительно ослабевает. Чтобы устранить это неудобство, употребляют в новейшее время такие гальванические снаряды, у которых оба разнородные металлы находятся погруженными не в одной, но в разных жидкостях, отделенных одна от другой скважистыми перегородками, пропускающими сквозь себя электрический ток...»

«В одном отделении, наполненном слабою кислотою или соляным раствором, помещена цинковая пластина; в другое отделение, где находится медная пластина, наливается раствор медного купороса или какой-нибудь другой медной соли. Обе пластины соединяются проводником и в таком виде образуют гальваническую цепь. В начале этой статьи было замечено, что в обыкновенных снарядах, коль скоро цепь будет замкнута, у медной пластины отделяется водородный газ, а цинк растворяется в кислоте. Растворение цинка происходит и в новых снарядах; но водородный газ здесь не освобождается, а служит для восстановления меди из ее раствора в металлическое состояние и для осаждения ее на поверхности медной пластины. Устроенные таким образом снаряды имеют то великое преимущество, что они гораздо постояннее обыкновенных снарядов и могут целые дни и даже недели находиться в непрерывном постоянном действии».

Представление Якоби о том, что выделение меди на положительном полюсе происходит вследствие восстановления медной соли водородом, неправильно, хотя и было общепринятым в то время. Подобным же образом растворение цинка на отрицательном полюсе рассматривалось как соединение с кислородом воды. В действительности на отрицательном полюсе металлический цинк переходит в ионы цинка, а на положительном полюсе «гальванического снаряда» происходит не выделение водорода, а разряд ионов меди с присоединением отрицательных зарядов и выделением металлической меди. Последняя реакция идет значительно легче, чем образование молекулярного водорода, в чем и заключается преимущество применения растворов медных солей в качестве электролита, соприкасающегося с положительным электродом.

Даниэль [Л. 6] не додел до правильного понимания механизма действия медноцинкового элемента. Как говорит В. Остwald в «Истории электрохимии»: «Даниэлю не удалось сделать последний решительный шаг, несмотря на то, что он был очень близок к нему. Он заметил, что его элемент может в течение долгого времени работать с одним и тем же количеством серной кислоты. Но последний вывод, что никакой серной кислоты вообще не нужно, не был им сделан». Якоби, разрабатывавший эту проблему независимо от Даниэля, впервые правильно объяснил роль электролитов в медноцинковом элементе, предложил замену серной кислоты раствором хлористого аммония и устройство элемента, обеспечивавшее снижение его внутреннего сопротивления. Б. С. Якоби является, таким образом, соавтором цепи, которая в настоящее время справедливо именуется элементом Даниэля — Якоби.

В поисках источника тока, который мог бы быть использован в его опытах, Якоби, однако, не остановился на медноцинковом элементе. В 1839 г. Грове предложил новую цепь из платины, концентрированной азотной кислоты, разбавленной серной кислоты и цинка. Якоби подверг эту цепь тщательному исследованию [Л. 7] и нашел, что ее э. д. с. значительно превосходит э. д. с. медноцинковой цепи, а внутреннее сопротивление значительно меньше. Большой интерес представляет выбор тех условий, в которых Якоби считает правильным проводить сравнение обеих цепей. Якоби выводит сначала формулу, связывающую с помощью закона Ома ток  $i$  с параметрами, характеризующими цепь. Обозначим через  $s$  общую поверхность

электродов батареи, в которой все элементы включены последовательно, через  $n$  — число элементов, через  $\lambda$  — внутреннее сопротивление элемента на единицу поверхности, через  $L$  — внешнее сопротивление в цепи и через  $E$  — э. д. с. элемента. Тогда внутреннее сопротивление каждого элемента равно  $\frac{\lambda}{s/n}$  и, следовательно,

$$i = \frac{nE}{\frac{\lambda n}{s} + L} = \frac{Ens}{n^2\lambda + Ls}.$$

Выведенное уравнение не учитывает поляризации электродов источника тока при прохождении тока.

Из этого соотношения вытекает, что ток максимален, когда  $\frac{n^2\lambda}{s} = L$ , т. е. когда внутреннее сопротивление батареи равно внешнему. Отсюда  $n = \sqrt{\frac{Ls}{\lambda}}$ ; мы получаем

таким образом, соотношение, указывающее, как выгоднее всего выбрать число элементов в батарее, чтобы получить максимальный ток при заданных общей поверхности электродов и внешнем сопротивлении. Ток этот равен

$$i_{\max} = \frac{E}{2} \sqrt{\frac{s}{\lambda L}};$$

отношение максимальных токов, которые могут быть получены с двумя разными цепями при одинаковом  $L$ , позволяет сравнить их эффективность. Якоби приходит к выводу, что в качестве материала анода шесть квадратных футов платины могут заменить в гальванической цепи стеклянных футов меди.

Батареи из элементов Грове были использованы Якоби для его знаменитых опытов со шлюпкой, снабженной электродвигателем. В письме к Фарадею Якоби сообщает: «Опыты прошлого года в соединении с последними усовершенствованиями батареи дают такой результат, что для получения одной лошадиной силы (как ее считают для паровой машины) необходима батарея с 20 кв. футами платины, распределенными соответствующим образом, однако, я надеюсь, что мне удастся получить те же результаты с 8—10 кв. футами платины» [Л. 8].

Наиболее широкая постановка проблемы гальванических элементов содержится в сообщении Якоби в Академии наук 7. I. 1842 г. «О моих электромагнитных работах 1841 г.» [Л. 9]. Якоби ставит вопрос о полезном действии гальванической батареи и электромагнитной машины: «Какое максимальное количество механической работы можно получить при электролитическом растворении заданного количества цинка?» Якоби считает, что в случае паровой машины этот верхний предел может быть точно определен (приводимый им расчет дает величину работы, которая может быть получена в случае испарения воды при 100°, и указывает: «иметь возможность численно выразить такой предел или хотя бы с уверенностью знать о его существовании, является неоценимым выигрышем для такого рода исследований, которые без этого повисли бы в воздухе и были бы лишены почвы...»; «...в ходе явлений, в которых тепло делается источником механической работы, нет и одного разрыва, не появляется ничего мистического»; «Совершенно иначе обстоит дело с электромагнитными машинами; форма явлений в этом случае проста, но агент, с которым имеешь дело, покрыт густым мраком. Весь же не знаем, что является при гальваническом действии причиной или следствием? Является ли растворение этого атома цинка необходимостью или же мешающим обстоятельством? Тепло говорит с нами разнообразнейшими способами, мы видим, чувствуем и измеряем, как и с какой силой оно приводит в движение молекулы теплозо».

При попытках найти механическую работу, которую можно получить при растворении данного количества цинка, Якоби приходит к выводу, что определения эти не имеют абсолютного значения — «...факт, который особенно удивит наших коллег химиков». А именно: «тот же атом цинка может производить различное количество механической работы в зависимости от того, растворяется ли он в цинковомедной или цинковоплатиновой батарее. В следнем случае, например, работа эта почти в  $1\frac{3}{4}$  раза

больше, чем в первом; вообще же она изменяется так же, как электродвигущая сила металлов, применяемых в батарее. Большинство до сих пор известных проявлений гальванического тока пропорциональны ему; здесь имеется первое исключение». Рассуждение Якоби замечательно как первая постановка вопроса о величине максимальной работы, которую можно получить от химического источника тока.

Статья заканчивается характерной для Якоби фразой: «...нужно прочно держаться одного фундамента — это фундамент научного развития. Дайте нам только время; к сожалению, если астрономы имеют возможность создавать себе научные памятники для отдаленного будущего, настоящее с жадностью ожидает наших детей, чтобы поглотить их, как только они выйдут из материинского чрева».

Одно из последующих наблюдений Якоби сыграло роль при дальнейшем развитии теории электрода (для потенциалов). Якоби показал, что обычный знак э. д. с. в цепи, состоящей из серебра и меди и даже из серебра и цинка, может быть изменен на обратный, если серебро поместить не в раствор азотнокислого серебра, а в раствор цианистого калия. Иначе говоря, металлы более благородные в присутствии цианистых солей делаются как бы менее благородными [Л. 10]. Как известно, изменение порядка расположения металлов в ряду напряжений в присутствии цианистых солей и других комплексообразующих электролитов было впоследствии использовано В. Нернштром в качестве аргумента в пользу его теории электродных потенциалов.

Последние исследования Якоби в области химических источников тока относились уже не к первичным, а к вторичным элементам — аккумуляторам. Якоби считал, что последнее удобнее использовать для приведения в действие электродвигателя, чем первичные элементы, хотя и указывает, что это не может привести к выигрышу работы: «...при превращении тепла в механическую работу, механический эквивалент тепла не может быть превзойден ни при каких обстоятельствах, что строго установлено с помощью различных опытов. Если предположить, что при превращении химических процессов батареи в теплоту и механическую энергию существует аналогичный эквивалент, правда не строго установленный, то при применении вторичной батареи нельзя получить большего полезного действия, чем при непосредственном применении первичной батареи» [Л. 11].

Якоби была сделана первая попытка использовать вторичные источники тока в практических целях: «Уже 25 лет тому назад мною было предложено применение контрбатареи, возникающей в результате поляризации, которую следовало использовать для телеграфных подводок в тех случаях, когда изоляция была или слишком хороша или недостаточна» [Л. 12]. Контрбатарея Якоби имела, однако, платиновые электроды, на которых можно накопить лишь небольшое количество электричества; позже, в опытах 1870 г., Якоби «...по предложению г-на Планте из Парижа, выбрал свинцовые пластины, погруженные в крепкую серную кислоту уда. в 1,3...»

Вторичным источникам тока была посвящена и последняя, оставшаяся незаконченной работа Якоби.

Работы Якоби по источникам тока дали толчок развитию этой области электрохимии в России и привели к появлению ряда оригинальных исследований. Так, Багратион, племянник героя Отечественной войны, первый предложил загущение электролита путем засыпки его порошкообразной массой, получившее широкое применение в практике элементного дела [Л. 13]. Влияние Якоби сказалось и на работах выдающегося электротехника и изобретателя П. Н. Яблочкива [Л. 14].

Якоби не только внес ряд новых идей в область химических источников тока, но значительно повысил также уровень техники измерения количества электричества, э. д. с. и внутреннего сопротивления гальванических элементов. Якоби обнаружил источник ошибки в вольтметре, в котором количество электричества определялось по объему выделяющегося гремучего газа, связанный с обратной реакцией образования воды на поверхности платиновых электродов [Л. 15]. Якоби указывает, что активность платиновых электродов зависит от чистоты металлической

поверхности, увеличивается при платинировке электродов и исчезает, если кислород и водород выделяются не одновременно, а порознь с помощью вспомогательного электрода. Вопрос о зависимости каталитической активности платиновых электродов по отношению к гремучему газу от условий поляризации подвергался изучению в работах ряда советских исследователей; однако наблюдения Якоби, повидимому, никогда не были подвергнуты систематической проверке с применением современных физико-химических методов, что представило бы бесспорный интерес. В связи с неточностью указанного объемного метода Якоби впервые предложил использовать для определения количества электричества реакцию электроосаждения металла (меди из раствора  $\text{CuSO}_4$ ) [Л. 16].

Для определения э. д. с. и внутреннего сопротивления гальванических элементов Якоби построил специальный прибор — вольтагометр [Л. 17], усовершенствованный Ленцем и Нервандером. Вольтагометр представляет собой переменное сопротивление из тщательно прокалиброванной платиновой проволоки, намотанной на мраморном цилиндре. Один конец проволоки был присоединен к латунной оси цилиндра, которая соединялась с одним из полюсов исследуемого источника тока; провод от другого полюса источника тока подводился к подвижному контакту в виде колесика, скользившего по проволоке при вращении цилиндра.

Положение колесика могло быть определено с большой точностью. Якоби показал, каким образом с помощью вольтагометра может быть найдено отношение внутренних сопротивлений и э. д. с. двух гальванических элементов. Метод Якоби не требовал знания зависимости величины отклонения магнитной стрелки от тока, что было весьма важно при использовании существовавших в то время измерительных приборов. Якоби указывает на сходство между схемой вольтагометра и схемой мостика, почти одновременно предложенной Уитстоном. Впоследствии Якоби предложил более точный прибор — ртутный вольтагометр, в котором примененное сопротивление состояло из двух платиновых проволок, концы которых могли быть погружены на различную глубину в наполненные ртутью трубы [Л. 17].

Открытие гальванопластики, исследование э. д. с., создание новых методов измерения важнейших величин, характеризующих электрохимические системы, ставят Якоби на одно из первых мест среди электрохимиков XIX в. Электрохимические работы Якоби, расцвет которых совпал с появлением тесно с ними связанных исследований Э. Х. Ленца и А. С. Савельева по теории поляризации, определили вместе с последними один из важнейших этапов развития электрохимии в нашей стране.

В заключение выражаем благодарность проф. Н. А. Бах и М. Г. Новлянской за помощь, оказанную при подготовке литературы.

## Литература

1. Б. С. Якоби. Ann. Phys. Chem., v. 40, 67, 1837.
2. Весциегель. Compt. Rend., 455, 1835; Ann. Phys. Chem., v. 37, 429, 1836.
3. Ф. Монг. Ann. Phys. Chem., v. 39, 129, 1836; v. 42, 76, 1837.
4. Б. С. Якоби. Bull. Sc. Acad. Sciences St. Pétersb., v. 2, 60, 1837; Ann. Phys. Chem. v. 43, 328. 1838.
5. Б. С. Якоби. Гальванопластика или способ, по данным образцам производить медные изделия из медных растворов помощью гальванализма, Спб. 1840.
6. Ж. Дапиэль. Phil. Trans. Roy. Soc., v. 107, 125, 1836
7. Б. С. Якоби. Bull. Sc. Acad. Sciences St. Pétersb., v. 6, 369, 1840; v. 10, 257, 1842; Ann. Phys. Chem., v. 50 510, 1840; v. 53, 336, 1841; v. 57, 85, 1842.
8. Б. С. Якоби. Phil. Mag., v. 15, 161, 1839. Русский перевод в книге Д. В. Ефремов и М. И. Радовский, Электродвигатель в его историческом развитии, М. — Л., 1936
9. Б. С. Якоби. Bull. Sc. Acad. Sciences St. Pétersb., v. 10, 71, 1842; Русский перевод в книге Д. В. Ефремов и М. И. Радовский. Динамомашин в ее историческом развитии. Ленинград, 1934.
10. Б. С. Якоби. Ann. Phys. Chem., v. 69, 207, 1846.
11. Б. С. Якоби. Bull. Sc. Acad. Sciences St. Pétersb., v. 15, 510, 1871; Ann. Phys. Chem., v. 150, 583, 1873.

12. Б. С. Якоби. Bull. classe phys. math. Acad. Sciences, v. 7, 30, 1849.  
 13. Б. С. Якоби. О батарее постоянного действия князя П. Багратиона. Bull. classe phys. math. Acad. Sciences, v. 2, 188, 1844.  
 14. Л. Д. Белькинд. Павел Николаевич Яблочкин. Госэнергоиздат, 1950.  
 15. Б. С. Якоби. Bull. classe phys. math. Acad. Sciences, v. 7, 161, 1849.  
 16. Б. С. Якоби. Bull. classe phys. math. Acad. Sciences, v. 9, 333, 1851.

17. Б. С. Якоби. Bull. Sc. Acad. Sciences St. Petersb., v. 10, 285, 257, 1842. Ann. Phys. Chem., v. 59, 145, 1843, v. 57, 85, 1842.

18. Б. С. Якоби. Bull. classe phys. math. Acad. Sciences, v. 8, 1, 1850; Ann. Phys. Chem., v. 78, 173, 1849.

Академик А. Н. ФРУМКИН и кандидат хим. наук А. Д. ОБРУЧЕВА

Институт физической химии Академии наук СССР



## Советская научная школа электропривода

С началом учебного 1922/23 г. в Ленинградском электротехническом институте им. Ульянова (Ленина) начала работать первая кафедра электропривода, с деятельностью которой связана в немалой степени электрификация ряда промышленных предприятий нашей страны.

Заслуживает быть отмеченным, что ни в одном из западноевропейских высших технических учебных заведений в тот период не было ни кафедр, ни лабораторий по данной специальности и не было учебных пособий по электроприводу.

На протяжении ряда лет кафедра Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина) была единственной в сети электротехнических высших учебных заведений и охватывала весьма широкий круг вопросов и разнообразные виды промышленного применения электропривода. Об этом говорит и наименование кафедры в то время: «Электрификация фабрик, заводов, горного дела, сельского хозяйства и судов».

На базе этой кафедры в институте была создана первая в СССР научно-исследовательская лаборатория электропривода. Она отвечала жизненно назревшей необходимости, так что научное использование лаборатории началось уже в период ее организации. К примеру, исследование трех видов электропривода строгального станка производилось непосредственно по мере окончания их монтажа, и принятые на основании этого исследования решения было положено в основу электрического привода изготавляемых на заводе строгальных станков.

Точно так же полученные, в итоге исследований подвесной электрической железной дороги, прокатки цветных металлов, системы автоматизации шахтной машины и других объектов, результаты были затем успешно применены в практической работе в различных отраслях социалистического народного хозяйства.

Разработка теории электропривода и создание основ теории электрификации промышленных предприятий являются основной заслугой кафедры, закрепившей вместе с созданными в дальнейшем аналогичными кафедрами и лабораториями в других вузах и научно-исследовательских институтах страны приоритет отечественной науки в этой отрасли электротехники.

Индустриализация СССР, бурный рост и развитие промышленности в годы сталинских пятилеток, восстановление и развитие народного хозяйства страны после Великой Отечественной войны привели к расширению первой кафедры электропривода. В настоящее время только в Ленинградском электротехническом институте им. Ульянова (Ленина) на базе этой кафедры работают четыре отдельные кафедры.

Руководителем первой кафедры электропривода и со-зателем одной из научных школ в этой области электротехники явился профессор Сергей Александрович Ринкевич, тридцать лет назад избранный по конкурсу на эту должность и утвержденный в 1922 г. Государственным ученым советом в звании профессора.



С. А. Ринкевич в 1912 г. окончил с медалью Петербургский электротехнический институт и с тех пор связан с институтом на протяжении всех лет. С 1919 г. он преподавал в институте курс «Электрическое распределение механической энергии», а с 1922 г. возглавил одноименную кафедру. Под руководством проф. С. А. Ринкевича кафедра успешно развернула работу по подготовке работников новой специальности и по проведению разносторонних научных исследований.

В 1925 г. было выпущено первое издание основного учебного курса С. А. Ринкевича еще под старым названием «Электрическое распределение механической энергии». Этот капитальный труд положил начало современной теории электропривода.

Сорокалетняя плодотворная работа С. А. Ринкевича в ЛЭТИ имела свои результатом выпуск хорошо подготовленных кадров для электрификации промышленных предприятий. Страна получила уже более 1000 инженеров этой специальности. Коллектив кафедры выпустил свыше 100 печатных трудов, среди которых более 30 учебников и монографий. По глубине разработки рассматриваемых вопросов выделяется капитальный двухтомный труд С. А. Ринкевича «Теория электропривода».

Профессор С. А. Ринкевич проявил себя не только как организатор и научный руководитель ряда крупных промышленных исследований, но также как конструктор первых советских электроприводов с индивидуальным двигателем.

Помимо научной деятельности профессор С. А. Ринкевич отдает много сил общественной работе.

Советское Правительство высоко оценило научную деятельность профессора С. А. Ринкевича. В 1937 г. он был утвержден в учченой степени доктора технических наук без защиты диссертации. За выдающиеся заслуги перед Советским государством в области науки и техники С. А. Ринкевичу в 1942 г. было присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники. Он награжден орденом Трудового Красного Знамени, медалями: «За оборону Ленинграда» и «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.», а также почетной грамотой Ленинградского Совета депутатов трудящихся.

Коллектив старейшей кафедры электропривода, воодушевленный историческими решениями XIX съезда партии, в тесном содружестве с работниками производства направляет теперь свои усилия на успешное разрешение важных научно-технических задач, вытекающих из директив съезда по пятому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР.

Кандидат техн. наук, доц. В. Е. МАНОЙЛОВ  
 Ленинградский электротехнический институт  
 им. Ульянова (Ленина)



## Об учебнике „Общая электротехника“ под редакцией С. А. Пресса

(Электричество, № 8, 1952, стр. 93)

Кандидат техн. наук, доц.  
Ф. И. ЧЕРНЯВСКИЙ

Новочеркасский политехнический  
институт им. Орджоникидзе

Рассматриваемая книга написана на основе одного из лучших дооценных учебников по общей электротехнике — книги проф. Е. К. Юрковского. При этом авторы, повидимому, поставили своей задачей вложить возможно большее содержание в небольшой объем, обусловленный ограниченным временем, отводимым на курс «Общей электротехники», для независимых специальностей высших технических учебных заведений. Это в основном авторам удалось. Однако все же следовало бы внести некоторые дополнения в рассматриваемый учебник.

Необходимо было кратко [примерно в том же объеме, как в учебнике Е. В. Китаева и Н. Ф. Гревцева или в старом учебнике Е. К. Юрковского (§ 114)] изложить принцип работы асинхронных двигателей с двойной клеткой и с глубоким пазом, которые имеют в настоящее время весьма широкое распространение. Необходимо было сравнить основные свойства вращающихся преобразователей — двигателя-генератора и одноякорного преобразователя — и указать, вследствие каких отрицательных свойств последний почти не применяется. Надо было также показать возможность работы коллекторных двигателей в цепи переменного тока, указать основные типы их (хотя бы однофазный последовательный и трехфазный параллельный) и пояснить причины, препятствующие их широкому распространению. Следовало бы несколько расширить, как указывает в своей рецензии В. П. Хащинский, параграф, посвященный параллельной работе трансформаторов, и дать понятие о напряжении короткого замыкания и об опыте короткого замыкания, хотя этот опыт и будет производиться на лабораторных занятиях.

Крупным достоинством рассматриваемого учебника по сравнению с ранее изданными является включение в него отдела шестого — «Электрический привод». С вопросами, изложенными в этом отделе, чрезвычайно часто приходится встречаться инженеру независимому любой специальности. Нельзя согласиться с замечанием В. П. Хащинского о недостаточном и поверхностном рассмотрении данной темы. По нашему мнению, материал, изложенный в отделе «Электрический привод», дает достаточное для курса «Общей электротехники» представление об основах выбора электродвигателей и об электрической аппаратуре. Более углубленное рассмотрение вопросов «Электрического привода» (а также и некоторых других вопросов электротехники — в зависимости от специальности) следует делать в специальных курсах, дополняющих «Общую электротехнику». Такие курсы предусмотрены учебными планами для многих независимых специальностей и для них нужно создать учебники. Нет необходимости включать в курс общей электротехники символический метод, эквивалентные схемы и круговую диаграмму асинхронного двигателя, так как все нужные для этого курса свойства цепей переменного тока и электрических машин могут быть рассмотрены с помощью более простых методов.

Отдел «Машины постоянного тока», вопреки мнению В. П. Хащинского, сокращен быть не может.

Остановившись на вопросе о порядке расположения отделов курса «Общей электротехники», считаю, что в этом курсе машины постоянного тока следует излагать раньше теории переменного тока, т. е. придерживаться того порядка изложения, которое имеет место в старом учебнике Е. К. Юрковского (издания 1937 г.). Многолетний опыт

преподавания «Общей электротехники» убеждает (несмотря на иное решение в программе Министерства высшего образования) в целесообразности такой последовательности курса, как дающей наилучшую усвоемость материала.

Такая последовательность изложения материала дает возможность конкретизировать и закрепить законы цепи постоянного тока и электромагнетизма в непосредственно за ними следующей теме «Машины постоянного тока», дающей для этого богатый материал, и в то же время при том объеме, в котором эта тема излагается в курсе «Общей электротехники», совершенно не требующей предварительного изучения основных законов переменного тока. Далее, при таком расположении материала курса изучение законов переменного тока происходит уже после основательного усвоения законов цепи постоянного тока и электромагнетизма, что только благоприятно сказывается на усвоении нового и своеобразного раздела, каким является теория переменного тока для впервые изучающего электротехнику.

Изучение работы трансформаторов и машин переменного тока в этом случае следует непосредственно за изложением теории переменного тока (а не отделяется, как в рассматриваемом учебнике, «Машины постоянного тока»), что дает возможность сейчас же закрепить соответствующие теоретические понятия и законы приложением их к объяснению свойств машин переменного тока.

Наконец, предлагаемое расположение материала (машины постоянного тока, теория переменного тока, трансформаторы и передача энергии, машины переменного тока, электропривод, электроника) дает возможность при изложении отдельных частей курса наиболее последовательно осветить историческое развитие соответствующих областей электротехники.

В качестве одного из существенных недостатков следует отметить, что вопросы истории развития электротехники и отдельных отраслей ее, включая вопрос о технико-экономических предпосыпках этого развития, весьма слабо освещены в рассматриваемом учебнике.

В конце рассматриваемого учебника даны в качестве приложения четыре таблицы, из которых три относятся к электрическому освещению и одна — к проводам. Нам кажется, что следовало бы увеличить число таких таблиц: привести основные данные о выпускаемых нашими заводами электрических машинах и трансформаторах, об аппаратуре высокого и низкого напряжения и т. п.

Не останавливаясь на ряде мелких недочетов, следует признать, что в целом учебник под ред. С. А. Пресса составлен хорошо и может служить полезным пособием для независимых специальностей высших учебных заведений.

Инж. В. К. БАЛУЕВ

Москва

Проф. С. А. Пресс справедливо указал, что книга перегружена и что в ней дано более чем достаточно сведений для специалиста независимого по общей электротехнике. Книгу надо сокращать, а не расширять. Нам представляется, что такие пути у авторов были.

Во-первых, учебное пособие по общей электротехнике надо направить по определенному адресу, а не вообще для независимых высших учебных заведений. Если писать книгу для отраслевых — машиностроительных, строительных, транспортных или иных групп вузов, то она будет целеустремленной, вопросы, более нужные для данной

специальности, будут изложены полнее и глубже, а менее нужные — в меньшем объеме. Электротехника сейчас так многогранна, что изучить глубоко все — просто затруднительно. Стремление дать в курсе как можно больше сведений по общей и прикладной электротехнике при небольшом количестве времени, отведенном для данного курса, ведет к тому, что не усваиваются и основные вопросы, нужные данному специалисту. Немудрено, что в практической деятельности встречаются специалисты неэлектрики, имеющие нетвердые познания в области электротехники. Немалая доля вины в этом лежит и на авторах учебников по электротехнике.

Во-вторых, не надо повторять в курсе многочисленные определения и элементарные сведения, известные уже студентам по курсу физики не только высшей, но даже и средней школы. Надо было развивать дальше то, что уже известно и изложено в курсе физики.

В-третьих, составление курса коллективом авторов требует большой методологической работы перед началом работы, чтобы отдельные главы как по содержанию, так и по форме изложения были написаны на высоком теоретическом и практическом уровне применительно к данной специальности вуза, а после окончания работы редактор должен жестко сократить все повторения, выправить терминологию, проверить построение глав и т. д. Такая тщательная работа дала бы в свою очередь значительное сокращение объема учебного пособия. Рецензент правильно указывает на несоблюдение этих правил в данной книге.

В-четвертых, учебное пособие для высшей школы — это не справочник. Например, таблицы на стр. 30, 85, 100 и др., также приложения I—IV не стоило помещать.

Вопросы терминологии имеют принципиальное значение, и напрасно проф. Пресс полагает, что надо продолжать пользоваться названиями, установленными в литературе. Ведь не так давно электрики применяли ряд терминов, от которых легко освободились. Необходимо настаивать на том, чтобы все авторы учебников боролись с засоренностью технического языка, вызванной слепым подражанием иностранным языкам, которое имело место в царской России. СССР занимает сейчас ведущее место в развитии мировой электротехники.

Вопросы методики изложения имеют решающее значение для определения ценности учебного пособия. Ведь авторы книг для специалистов неэлектриков имеют дело с понятиями, определениями, законами, уже известными слушателям. С методической точки зрения приходится согласиться с рецензентом по вопросу о месте изложения теории машин постоянного тока (после машин переменного тока).

Можно также присоединиться к рецензенту в вопросе об увеличении, нужным с методической точки зрения, раздела «Электропривод» за счет хотя бы части раздела «Машины постоянного тока» и особенно раздела «Электрические измерения», безусловно обширного для специалистов неэлектриков.

С методической же точки зрения целесообразнее издавать курс общей электротехники для неэлектротехнических высших учебных заведений в двух частях: в одной изложить основы теории, а в другой — прикладную часть — электропривод, освещение, электронику и т. д. Первая часть могла бы быть действительно общей для неэлектротехнических вузов. Написанная высококвалифицированным специалистом, она могла бы издаваться большими тиражами, что, кстати, значительно удешевила бы книгу (это немаловажно для студентов).

Рецензируемая книга, заслуживая в целом положительную оценку, нуждается в устранении серьезных недостатков и пробелов при последующих изданиях.

**Кандидат техн. наук, доц.  
ГРУШЕВСКИЙ**

**Донецкий индустриальный институт**

Каждый, кто преподает общую электротехнику, знает, как трудно добиться усвоения студентами даже предписанного программой основного материала, не говоря уже о дополнительном, факультативном. Усвоение отдельных,

на первый взгляд простых вопросов курса требует напряженной и часто продолжительной умственной работы.

В числе причин, создающих эти трудности, можно указать следующие:

1. Физическое содержание электромагнитных процессов в электрических цепях, машинах и аппаратах не вытекает непосредственно из их устройства.

2. Достаточно простой и стройной логической схемы описания электромагнитных процессов не существует.

3. Геометрический характер связи между величинами, относящимися к переменному току, отличается от привычных алгебраических соотношений.

Усвоению курса отнюдь не способствует нагромождение материала в ряде учебников общей электротехники, изданных в последние годы. Излишне большой объем учебника — это серьезный недостаток, так как купюры подчас невозможны без нарушения цельности изложения. Этот упрек относится и к учебнику И. Р. Бельского и др. под ред. С. А. Пресса. К сожалению, в рецензии В. П. Хашинского заметно стремление еще больше увеличить объем книги и превратить учебник в энциклопедию электротехники.

В основу работы над составлением доброкачественного учебника пора положить принцип сокращения до возможных разумных пределов объема книги, стремление удалить из нее все лишнее. 25—30 печатных листов вполне достаточно при условии безупречного, ясного изложения.

Без ущерба для курса можно исключить раздел об электрическом поле. Для понимания роли емкости в цепи переменного тока достаточно знаний, полученных в курсе физики. Нет нужды выделять в специальный раздел вопросы изоляции. Лишним можно признать раздел об электролизе и аккумуляторах. Различные методы расчета сложных цепей (методы контурных токов, наложения, узлового напряжения и др.) совершенно излишни в курсе общей электротехники. Изящный символический метод неизбежно дублирует более наглядный метод векторных диаграмм и притом усвоение символического метода требует значительной траты времени. Учитывая содержание и целевое назначение курса общей электротехники, надо признать, что вполне достаточно владеть методом векторных диаграмм.

Отдел шестой рецензируемого учебника — «Электрический привод» — написан очень удачно. И по объему, и по характеру изложения он вполне соответствует задачам курса.

Машины постоянного тока нельзя помещать после машин переменного тока, не нарушая педагогических принципов. Наоборот, их следует изучать раньше, до теории переменного тока. В самом деле, основное содержание раздела об электромагнетизме и электромагнитной индукции нельзя трактовать иначе, как преобразование электрической энергии в механическую и обратно. После этого вполне логично перейти к практическим приложениям — машинам постоянного тока. Такой порядок облегчает усвоение курса, быстрее вводит в круг практических вопросов. Ссылка рецензента на общепринятый порядок неубедительна. Систематическое изложение теоретических основ, а затем — электрических машин, как это принято в данном учебнике, отрывает теорию от ее практических приложений, составляющих основное содержание курса.

Очень ответственным является изложение теоретических основ электротехники. Рецензируемый учебник в этом отношении не свободен от недостатков. Приведу примеры.

Последний абзац § 1-1 содержит в неявной форме неправильное определение постоянного тока, как неизменяющегося во времени. Тем самым внушается и без того легко возникающая мысль о постоянстве в цели тока независимо от режима.

В § 1-2 вместо определения сопротивления приводится лишь физическое содержание этого понятия применительно к омическому сопротивлению.

На стр. 30, без всяких оговорок, дается неправильное в общем случае определение проводимости как величины, обратной сопротивлению.

В § 1-3 для выяснения понятия напряжения вводится понятие потенциала, затем в § 1-4 от него отказываются в пользу энергии, расходуемой единицей количества электричества. Определение однородной с напряжением вели-

чины э. д. с. удачно обходится без потенциала. Вряд ли промежуточное понятие потенциала из области электростатики способствует выяснению электрокинетических процессов.

На стр. 31 читаем: «Разность потенциалов точек А и В в этом случае (подчеркнуто мной — Б. Г.) называется напряжением...» А в общем случае?... Таким образом, определения напряжения не получилось. Кстати, для цепи переменного тока понятие потенциала уже неприменимо, тогда как напряжение остается в силе.

Здесь же (глава первая) путаница с терминами «напряжение» и «падение напряжения».

В изложении второго закона Кирхгофа неясно, как выбрать знаки э. д. с., так как отсутствует явно выраженное условие о направлении э. д. с. вдоль контура.

В § 1-7 нельзя понять, почему выражение мощности через ток и сопротивление неприменимо в случае активной цепи (при наличии э. д. с.) и будет ли в этом случае пригодно выражение мощности через ток и напряжение, выведенное, повидимому, для пассивной цепи.

Недостатки в определениях основных понятий и величин имеют место и в дальнейшем изложении курса. Приведенные примеры говорят о необходимости очень тщательной обработки учебника.

## Электроснабжение промышленных предприятий

(Электричество, № 10, 1951, стр. 93—96)

**Инж. С. К. СУРКОВ**

Физический институт им. Лебедева  
Академии наук СССР

Книга А. А. Федорова и Б. А. Князевского является первой попыткой создать общий (не отраслевой) курс электроснабжения и является ценным пособием для инженерно-технического состава, работающего в области проектирования электроснабжения промышленных предприятий, а также для работников отделов главного энергетика промышленных предприятий.

Книга написана простым и ясным языком, понятным для всех работающих в этой области. Но в книге не затронут ряд вопросов, необходимых для правильной эксплуатации электрохозяйства и которые необходимо учесть авторам книги при последующем издании. Перечислю основное.

В книге нет такого нужного раздела, как электрооборудование установок постоянного тока. Нет сведений о новых способах отыскания повреждений кабелей, проложенных в земле, о профилактическом испытании электрооборудования, о дуговых и высокочастотных электрических печах, об электрооборудовании сварочных постов, об электрооборудовании гальванико-электролизного производства.

Раздел, посвященный коэффициенту мощности, следует дополнить вопросом о компенсации при помощи синхронных двигателей с примерным практическим расчетом.

Касаясь отзыва С. П. Розанова, считаю, что писать курс электроснабжения для каждой отрасли промышленности в отдельности совершенно не нужно, так как ход расчета проекта электроснабжения для всех отраслей промышленности одинаков. Расчет нагрузок, проводов, кабелей, выбор аппаратуры и распределительных устройств, выбор числа и мощности подстанций — не зависит от отрасли промышленности. Выбор схемы электроснабжения зависит только от категории потребителей и значения этих потребителей в народном хозяйстве страны, а потребители 1-й, 2-й и 3-й категорий есть почти во всех отраслях промышленности.

**Инж. П. А. ВАСИЛЬЕВ**

Трест „Электромонтаж-52“ МСПМ

Как учебник, книга А. А. Федорова и Б. А. Князевского, несомненно, отвечает своему назначению. Но вместе с тем хотелось бы, чтобы эта книга в большей степени отвечала требованиям инженеров, работающих в промышленности. В этом смысле необходимо сделать следующие замечания.

Странно, почему авторы не сделали анализа и оценки способа определения электрических нагрузок методом теории вероятностей, остановив свое внимание только на двухчленной формуле, принятой для расчетов в МСПМ. Этот раздел должен быть иллюстрирован примером не только из машиностроения, но и из других отраслей промышленности.

Главу IV «Подстанции промышленных предприятий» следует дополнить выбором наивыгоднейшей мощности

трансформаторов внутрицеховых подстанций по схеме блок-трансформатор-магистраль и дать пример. Необходимо также показать конструктивное исполнение комплексных трансформаторных подстанций для внутренних и наружных установок, широко применяемых в нашей промышленности; добавить сведения о защите на постоянном токе.

В гл. VI нужно привести пример выбора и конструктивного исполнения заземления (рабочего и защитного).

В гл. VII «Автоматизация электроснабжения промышленных предприятий» необходимо расширить раздел диспетчеризации с применением телесигнализации и телеуправления в системах электроснабжения промышленных предприятий и иллюстрировать его примером.

Совершенно непонятно, почему авторы обошли печные и преобразовательные подстанции, причем бросается в глаза явная нелогичность: в гл. IV приведена одна из схем преобразовательной подстанции с очень коротким описанием, а в разделе конструкций об этой подстанции ничего не сказано.

Незаконченным является раздел токов короткого замыкания и релейной защиты; его необходимо представить в конспективном, сжатом и очень удобном для пользования виде, но полностью.

При переиздании книги должны быть учтены замечания инженеров производства для дополнения книги соответствующими материалами, отвечающими их запросам и нуждам.

**Инж. Б. Ю. ЛИПКИН и инж. В. А. НАЙДИС**

Московский станкостроительный техникум

Проф. С. П. Розанов считает нецелесообразным выпуск книги по электроснабжению без отраслевого уклона; он полагает, что не может быть курса электроснабжения промышленных предприятий «вообще». Однако, как известно, в высших и средних технических учебных заведениях наряду с курсом «Электрические машины» имеется также курс «Электропривод», который по существу развивает ряд положений курса «Электрические машины». Таково же положение и с курсом «Осветительные установки», который проходится как общий курс осветительной техники в электротехнических учебных заведениях. Но это не исключает прохождения специальных курсов по электроосвещению отдельных отраслей промышленности.

Нам кажется неправильным отмеченный взгляд С. П. Розанова на то, что в курсе «Электроснабжение промышленных предприятий» не следует якобы повторять и развивать основные узловые вопросы из курсов «Электрооборудование станций и подстанций», «Электрические машины» и «Электрические измерения».

Курс электроснабжения может и должен не только базироваться на перечисленных курсах, но и давать методы их практического применения в вопросах электроснабжения промышленных предприятий любой отрасли промышленности.

Например, как известно, вопросы защиты подстанции промышленных предприятий имеют несколько

иной объем, чем в курсе «Электрооборудование станций и подстанций», и это не может не быть отражено при чтении курса «Электроснабжение». Проф. Розанов предлагает довольно непонятную формулировку применения указанных основных профилирующих курсов, а именно: «...синтез знаний, полученных при изучении этих курсов на базе конкретной отрасли производства. Необходимо установить их связь и взаимопроникновение (!?), взаимовлияние и взаимодействие...» Трудно сказать более сложно и непонятно, чем это сделал проф. Розанов. Одно вместе с тем ясно: предмет «Электроснабжение промышленных предприятий» имеет вполне выкристаллизовавшуюся тематику, которая охватывает именно общие вопросы электроснабжения. Авторы рассматриваемых книг — А. А. Федоров и Б. А. Князевский, а также Ю. Л. Мукосеев в своих книгах рассмотрели именно общие вопросы, касающиеся электроснабжения всех промышленных предприятий (расчетные нагрузки, электрические сети до 1 000 в, цеховые трансформаторные подстанции, распределение электроэнергии на высоком напряжении, повышение  $\cos\varphi$ , заземление и зануление). С проф. Розановым можно согласиться, что из указанных вопросов раздел «Заземление и зануление» вполне охватывается курсом «Техника безопасности», и поэтому из курса «Электроснабжение» он может быть изъят. Все остальные вопросы могут и должны рассматриваться общим курсом электроснабжения промышленных предприятий.

В курсе электроснабжения должны, помимо всего, охватываться вопросы: экономики электроснабжения и повышения  $\cos\varphi$ , эксплуатации электрооборудования, экономичные режимы работы трансформаторов; допустимые перегрузки при работе трансформаторов и другого электрооборудования; определение места повреждения кабельных линий.

Внесение указанных дополнений в последующие издания учебника по электроснабжению промышленных предприятий значительно улучшит общее содержание книги.

**Инж. А. А. КУЛАКОВ**

*Москва*

Наряду с общими цennыми качествами, бесспорно имеющимися в книге А. А. Федорова и Б. А. Князевского, в ней недостаточно полно освещен вопрос релейной защиты, мало уделено внимания эксплуатационным вопросам, а вопрос экономии электроэнергии рассмотрен односторонне — только в части повышения коэффициента мощности. Эти недостатки легко исправить в следующих изданиях книги.

**Кандидат техн. наук, доц. М. М. СОКОЛОВ**

*Московский энергетический институт  
им. Молотова*

Курс «Электроснабжение промышленных предприятий» читается в ряде высших учебных заведений различных профилей. Он дает возможность будущим инженерам с известными навыками подойти к вопросу выбора и расчета рациональной схемы электроснабжения промышленного предприятия на основании проведения технико-экономического анализа.

При составлении учебного пособия по электроснабжению промышленных предприятий не следует решать задачу узко для какой-нибудь одной отрасли промышленности. Наиболее интересные отраслевые вопросы могут быть рассмотрены в конкретных примерах, иллюстрирующих то или иное положение книги. Задачи политехнического образования требуют именно такой постановки вопроса в учебном пособии по электроснабжению.

Книга А. А. Федорова и Б. А. Князевского является, как говорят авторы, «первой попыткой» создать систематизированный курс по электроснабжению. Начинание безусловно положительное! Следует, однако, заметить, что неправильно было этой книге уже в первом издании ее присваивать

гриф «учебник», хотя книга и написана в соответствии с программой курса электроснабжения.

Основным методическим недостатком книги является повторное изложение материалов, относящихся к смежным курсам. Зачем, например, авторы внесли в книгу раздел о контакторах и реле (стр. 111—116)? Сведения, приводимые в разделе, по своему содержанию не могут принести пользы студентам, тем более, что указанная аппаратура рассматривается более подробно в курсе «Управление электроприводами». В значительной степени можно было бы сократить также часть книги, связанную с учетом электрической энергии (стр. 176—184), так как этот раздел подробно читается в курсе «Электрические измерения». Авторы напрасно тратят много места на различные виды распределительных устройств; подобные рисунки могут быть найдены в ряде литературных источников и каталогов. Так, например, на фиг. 4-62, приведен чертеж распределительного щита низкого напряжения, различные варианты которого широко известны и не требуют пояснений. Весьма же существеному вопросу о преимуществе комплектных щитов, вопросу, который должны твердо усвоить студенты, посвящены две ничего не говорящие строки (нижние строки на стр. 228). В этом разделе большее внимание должно быть уделено принципам конструирования распределительных устройств с точки зрения электроснабжения промышленных предприятий.

Авторам книги следовало бы обратить внимание и на тщательность подбора характерных для промышленных предприятий примеров. Зачем на фиг. 7-10 представлена мнемоническая схема электрической станции? Системы электроснабжения имеют достаточное количество подобных примеров. Когда речь идет о самозапуске двигателей, рассматриваются двигатели 2 кв (фиг. 7-6), которые вовсе не характерны для промышленных установок, а имеются лишь в некотором количестве на электрических станциях.

Целесообразно было бы в значительной степени сократить гл. VI книги, так как рассматриваемый в ней материал сообщается студентам в курсе «Техника безопасности».

Можно было бы назвать еще ряд мест в книге, которые повторяют смежные курсы, читаемые студентам.

Новый учебный план кафедры «Электрооборудование промышленных предприятий» МЭИ предусматривает значительное изменение структуры и содержания курса «Электроснабжение промышленных предприятий». В плане предусмотрено изложение таких вопросов, как электроснабжение потребителей на постоянном токе, преобразовательные и печные подстанции промышленных предприятий, расчет контактных проводов и т. п. Эти вопросы, являющиеся специфическими для электроснабжения, необходимо обязательно осветить в книге, рассчитанной на студентов, специализирующихся в области электрооборудования промышленных предприятий.

При издании учебного пособия по электроснабжению промышленных предприятий должны быть учтены изменения, произведенные в учебных планах. В настоящее время ни одно из учебных пособий по электроснабжению промышленных предприятий не удовлетворяет новым учебным планам.

Книга по электроснабжению должна иметь ряд разделов, которые в настоящее время, к сожалению, совершенно не затрагиваются авторами. Необходимо обратить внимание на диспетчерское управление всем электрическим хозяйством промышленного предприятия (§ 7-6 книги по существу не дает студентам представления по данному вопросу). В книге необходимо уделить соответствующее внимание вопросам автоматизации электроснабжения. Более широко должны быть освещены вопросы технико-экономического анализа различных вариантов электроснабжения, включая и вопросы экономии электрической энергии на промышленных предприятиях. Книгу следует более широко иллюстрировать примерами, разъясняющими основные положения, изложенные в тексте.

Таким образом, попытка создания систематизированного курса, несмотря на отмеченные недостатки, заслуживает общей положительной оценки. Авторы встали на правильный путь в отношении обобщения материалов по электроснабжению в различных отраслях. Книга по электроснабжению, являющаяся учебным пособием, в первую

очередь должна удовлетворять по своему содержанию студентов, специализирующихся в этой области. При написании новой книги по электроснабжению должно быть проведено четкое разграничение со смежными курсами и должно быть включен ряд новых разделов, связанных непосредственно с электроснабжением промышленных предприятий.

## Проф. П. Г. ГРУДИНСКИЙ

Кафедра „Электрические станции“ ВЗЭИ

Забывая об основном назначении книги (как учебника), выступающие подходят к ней, как к пособию для инженерно-технических работников, занимающихся электроснабжением. Насколько можно судить из вступления, предпосланного дискуссии, такого же взгляда придерживается и редакция.

Нам представляется совершенно неправильным такое направление обсуждения. К учебнику надо предъявлять иные требования, чем к книге для инженерно-технического персонала. Учебник должен содержать основные, хорошо проверенные сведения, не затрагивать второстепенных деталей, должен быть кратким, соответствовать учебной программе, т. е. учитывать разделение материала между смежными курсами. Учебник должен соответствовать уровню подготовки студента и учитывать, что институт не может выпустить готовых инженеров и что студенту в вузе необходимо усвоить основы, с тем чтобы впоследствии самому еще многому учиться.

Полезность учебника для практических работников является его дополнительным свойством, не всегда, однако, свидетельствующим о ценности книги как учебника. Книга А. А. Федорова и Б. А. Князевского написана как учебник, в качестве учебника она допущена Министерством высшего образования, и потому ее в первую очередь и нужно оценивать, как учебник. Однако перед такой оценкой книги приходится решать вопрос, поднятый С. П. Розановым: может ли существовать курс электроснабжения промышленных предприятий «вообще» или должны быть только отраслевые курсы? Проф. Розанов считает, что общего курса быть не может, так как в общем курсе невозможно отразить тесную связь между производством и электроснабжением.

По нашему убеждению, связи между производственным процессом и электроснабжением не таковы, чтобы препятствовать обобщению принципов и методов электроснабжения разных производств в одном курсе. В электротехнических институтах возможно и нужно существование только общего курса электроснабжения. Нужен такой именно курс потому, что электротехнические институты являются по существу политехническими, а политехническому образованию соответствует широкая, обобщенная постановка вопросов. Возможен только такой курс потому, что на ряд отраслевых курсов в учебном плане нехватило бы времени. С. П. Розанов в своем высказывании отражает узкую точку зрения отраслевого вуза, но для доказательства этой точки зрения в его выступлении нехватает конкретности.

Обращаясь же к конкретному материалу учебника и рассматривая его по главам, легко убедиться, что изложение только выиграло от того, что оно ведется обобщенно для всех производств. Определение электрических нагрузок (глава первая) было бы вообще нецелесообразно производить отдельно для каждого типа производств, так как от студента осталась бы скрытой общность метода и была бы затруднена возможность сопоставления и сравнения.

Несомненно, что методика распределения энергии в промышленных предприятиях имеет больше общего (главы вторая и третья), чем отличного, на предприятиях любого типа. Применяются одни и те же системы (централизованная или от небольших подстанций в цехах), одни и те же конструкции канализации энергии, одна и та же защита. Без изменения остаются методы выбора напряжения, схемы соединений, методы расчета и методы обеспечения резервного электроснабжения. Ни про один из этих методов или конструкцию нельзя сказать, что они применяются, скажем, только в химическом машиностроении и не применяются в производствах иного назначения.

Еще более общими являются конструкции подстанций промышленных предприятий (глава четвертая). Если бы изложение велось по отраслям промышленности, то этот материал пришлось бы полностью повторять. С не меньшим основанием это положение применимо к методам повышения коэффициента мощности (глава пятая), к защитным заземлениям (глава шестая) и к автоматизации электроснабжения (глава седьмая). В то же время не вызывает сомнения, что эти вопросы следует излагать иначе, чем при рассмотрении сетей энергосистем или коммунальных предприятий.

Однако не следует думать, что мы отрицаем отсутствие связи между решением задачи электроснабжения и характером производства. Эта связь существует, но в первую очередь она отражается на электроприводе. Между типом электроприводов (крупные или мелкие двигатели, типы двигателей, характер их нагрузки) и электроснабжением имеется непосредственная и тесная связь. Наличие промежуточного звена в виде электропривода и позволяет провести обобщения, из которых связь с производством на первый взгляд выпадает.

С. П. Розанов (отчасти и Э. М. Каждан) уделяет много внимания имеющемуся будто бы параллелизму между учебником А. А. Федорова и Г. А. Князевского и учебниками по курсам станций, сетей и т. д. При этом перечисляются учебники, принятые для специальности «Электрические станции, сети и системы» и не подходящие для специальности «Электрификация промышленных предприятий». В учебных планах этой последней специальности курс «Электрических станций, сетей и систем» очень небольшой, имеет целью дать основы, которые затем развиваются и конкретизируются в курсе «Электроснабжение промышленных предприятий», так что ни о каких повторениях студентом пройденных материалов не может быть речи.

У проф. Розанова имеются прямые упреки авторам книги в заимствовании материала из других книг. При составлении учебника такое заимствование нам представляется вполне законным, однако в данном случае и его нет — имеется использование одних и тех же типовых решений, типовых конструкций и типовых сооружений, т. е. обобщение «богатого опыта практики и архивных материалов проектно-монтажных организаций», за которое ратует проф. Розанов. Если сравнять между собой те учебники, на которые он ссылается, то у них между собой обнаружится значительно больше общего материала, чем с рецензируемой книгой, что и понятно, так как они написаны для одной и той же специальности.

Если положить с одной стороны толстые тома учебников и монографий, которые перечислил проф. Розанов в своей рецензии с указанием, что их материал повторяется в книге А. А. Федорова и Б. А. Князевского, а с другой стороны — очень небольшой по объему рецензируемый учебник (всего 22 печатных листа), то станет ясной неправедливость подобных упреков.

Мы убеждены, что Министерство высшего образования правильно поступило, утвердив для электротехнических институтов общий курс электроснабжения промышленных предприятий, а не ряд курсов по электроснабжению отдельных типов производств; мы считаем, что оно правильно наметило программу этого курса и правильно определило тип книги, могущей называться учебником. Мы думаем, что учебник для студентов могут лучше всего написать преподаватели данного курса, и не разделяем надежды, высказанной Л. Б. Гейлером, что такой учебник могут написать работники производства.

Необходимость дать принципиальное обоснование позиций, с которых должна производиться оценка учебника по электроснабжению промышленных предприятий, отвлекла нас от непосредственной оценки книги. Признавая, что авторы правильно выбрали вопросы, освещенные ими в учебнике, необходимо согласиться, однако, с тем, что они осветили не все нужные вопросы. В этом отношении особенно ценные замечания, сделанные Л. Б. Гейлером: авторам следовало бы уделить внимание электроснабжению крановых, сварочных и преобразовательных установок, полнее осветить вопросы снижения потерь энергии, по-иному подойти к решению вопроса об улучшении коэффициента мощности, дать материал по несимметричным режимам.

Очень существенны указания ряда рецензентов на то, что изложение материала не всегда сопровождается его

анализом. Студенту иногда даются указания, как надо делать, и не всегда поясняется, почему именно так делается. Этот недостаток особенно существен в разделах, относящихся к определению нагрузок (стр. 18—20), к выбору трансформаторов (стр. 154—157), к выбору схем распределения энергии на высоком и низком напряжении (стр. 38—42 и 118—119). Сущность рекомендуемых методов не раскрыта, не показано их историческое развитие, не дано сопоставления с другими существующими методами.

В отдельных случаях, при объяснениях к рекомендуемым методам, авторы делают прямые ошибки. Так, например, в главе о повышении коэффициента мощности имеется утверждение, что экономический эквивалент реактивной мощности зависит от относительного снижения потребления реактивной мощности данной установки. Этот вывод неправилен, он относится только к частному случаю, когда вся мощность, передаваемая по данной цепи, потребляется одной установкой. Обычно же от одной цепи (например, от линии передачи 110 кв) питается несколько

установок, потребляющих каждая небольшую часть полной мощности. В таких случаях возможно снижение потребления реактивной мощности одной из установок до нуля без существенного влияния на экономический эквивалент реактивной мощности.

Принципиально неправильно подсчитывается экономия энергии от замены двигателя в примере на стр. 243, когда нагрузочные потери мощности в максимум умножаются на продолжительность использования максимума, а не на время потерь.

Имеются и другие ошибки. Однако, несмотря на недостатки в изложении, иногда достаточно существенные, нельзя не признать, что авторы правильно определили общее направление книги и правильно выбрали основной материал.

Книга пригодна для применения в учебном процессе и на производстве, хотя при пользовании ею в нее придется вводить ряд корректировок.

## О мерах повышения коэффициента мощности электроустановок промышленных предприятий

ОТ РЕДАКЦИИ

*Задача рационального ведения энергетического хозяйства, сокращения потерь в электрических сетях и увеличения их пропускной способности выдвинула в качестве одного из основных мероприятий для ее успешного разрешения вопрос о повышении коэффициента мощности электроустановок промышленных предприятий.*

*Проведенное в марте 1952 г. Всесоюзным научным инженерно-техническим обществом энергетиков научно-техническое совещание по повышению коэффициента мощности отметило, что советские энергетики, наряду с успехами в области оснащения промышленности энергетическим оборудованием, развитием электрических сетей и подстанций, добились в ряде отраслей промышленности определенных успехов и в области повышения коэффициента мощности. Однако на отдельных предприятиях и в некоторых отраслях промышленности (Миннефтьпром, Минтяжмаш, Минлегпром и др.) коэффициент мощности продолжает оставаться еще на низком уровне.*

*Напечатанные в разделе «Из опыта работы» № 5 журнала за 1952 г. статьи К. И. Скоркина, О. П. Шишкина, А. Ф. Киселева и др., посвященные опыту применения синхронизации асинхронных двигателей, вызвали со стороны читателей ряд откликов, часть которых публикуется ниже.*

*Редакция обращается к читателям с предложением в своих выступлениях в последующих номерах журнала останавливаться не только на синхронизации асинхронных двигателей, которая является лишь частным мероприятием в рассматриваемой области, но высказаться также по всем остальным принципиальным вопросам, могущим представить научно-технический интерес при разрешении важной народнохозяйственной задачи сокращения потерь в электрических сетях путем повышения коэффициента мощности.*

**Доктор техн. наук И. А. СЫРОМЯТНИКОВ**

**Техническое управление Министерства  
электростанций СССР**

Вопрос об уменьшении потребления реактивной мощности и повышении в электроустановках коэффициента мощности имеет весьма большое народнохозяйственное значение. Из-за недостаточного выпуска электропромышленностью синхронных двигателей, статических конденсаторов и синхронных компенсаторов в ряде энергосистем нехватает реактивной мощности. Это приводит к тому, что напряжение в сети и у части потребителей находится на низком уровне.

Эксплуатация при пониженном напряжении увеличивает потери в сетях и ухудшает условия работы асинхронных двигателей и других электроустановок.

Повышение коэффициента мощности приводит к уменьшению потерь в сетях и дает возможность обеспечить электроэнергией ряд новых потребителей. Но повышение коэффициента мощности — не самоцель, и нельзя, например, увеличивать коэффициент мощности за счет таких мероприятий, которые приводят к недопустимому увеличению потерь, требуют больших капитальных затрат или влекут за собой понижение надежности работы потребителей и энергосистемы. Целесообразность применения того или иного мероприятия должна подтверждаться технико-экономическими расчетами.

В связи с этим весьма важно наметить правильную техническую политику в вопросе повышения коэффициента мощности.

В этом аспекте рассмотрим синхронизированные асинхронные двигатели с точки зрения целесообразности ориентации на этот способ в дальнейшем. Для уже установленных асинхронных двигателей с фазным ротором в ряде случаев применение синхронизации безусловно целесообразно в связи с временным отсутствием в достаточном количестве более совершенных средств компенсации (синхронные двигатели и статические конденсаторы).

Предложенная группой автора схема ДАГ с питанием возбуждения от селеновых выпрямителей, подключенных к той же сети, от которой питается двигатель, не только не устранила недостатки, присущие ранее применявшимся синхронизированным двигателям, но и увеличила их. Зависимость тока возбуждения двигателя от напряжения сети приводит к тому, что при понижении напряжения сети ток возбуждения двигателя уменьшается.

<sup>1</sup> К. И. Скоркин. Синхронизация асинхронных электродвигателей на шахтах комбината «Сталинуголь»; О. П. Шишкин. Итоги внедрения синхронизации на нефтяных промыслах Грозного; А. Ф. Киселев и М. Я. Бексов. Синхронизация асинхронных двигателей по схеме ДАГ в асbestosовой промышленности; А. М. Оржевский, С. Г. Эмман и И. М. Рабинович. Повышение коэффициента мощности на предприятиях мукомольной промышленности; Г. М. Бердичевский. О формуле для определения рентабельности синхронизации асинхронных двигателей. Электричество, № 5, 1952.

Вследствие этого синхронизированный асинхронный двигатель, обладающий ничтожной перегрузочной способностью, даже при номинальном напряжении переходит в асинхронный режим при значительно меньших снижениях напряжения в сети, при которых выпадает из синхронизма нормальный синхронный двигатель. Применение автоматики в схеме ДАГ устраняет этот недостаток синхронизированного двигателя только в том случае, если мы рассматриваем выпадение из синхронизма одного или небольшого числа синхронизированных двигателей. Совершенно иное положение будет при широком применении таких двигателей в промышленности. В этом случае при выпадении из синхронизма вследствие даже кратковременного снижения напряжения сети будут иметь место значительное увеличение потребления реактивной мощности и, как следствие этого, дополнительное снижение напряжения и необходимость массового отключения двигателей для их поочередного повторного пуска. Таким образом, если широкое применение нормальных синхронных двигателей повышает устойчивость работы как энергосистемы, так и потребителей, то, наоборот, широкое применение синхронизированных асинхронных двигателей неизбежно приведет к понижению устойчивости работы энергосистемы и потребителей.

Поэтому широкое применение синхронизации асинхронных двигателей по схеме ДАГ недопустимо. Синхронизация асинхронных двигателей ввиду отсутствия в достаточных количествах более рациональных способов повышения коэффициента мощности может и должна применяться в существующих установках временно, в ограниченных масштабах, не отражающихся на устойчивости энергосистемы.

Несколько слов по существу о схеме ДАГ. Неправильно, что эта схема коренным образом отличается в лучшую сторону от ранее применявшихся схем синхронизации асинхронных двигателей. В действительности, как уже было указано выше, авторы схемы ДАГ еще более ухудшили и без того плохие показатели синхронизированных асинхронных двигателей, применив питание возбуждения двигателя от селеновых выпрямителей. Собственно говоря, только этим по существу отличается схема ДАГ от синхронизированных асинхронных двигателей, выпускавшихся ХЭМЗ еще в 1924 г., имевших аналогичную автоматику. Авторы схемы ДАГ рекламируют устройство с весьма низкими энергетическими показателями и с небольшим сроком службы применяемых в нем селеновых выпрямителей.

Таким образом, синхронизированный асинхронный двигатель с селеновыми выпрямителями по схеме ДАГ является, безусловно, одним из самых худших суррогатов синхронизированного двигателя, применявшихся раньше.

Сторонники широкого применения схемы ДАГ неоднократно ставили вопрос о пересмотре решения Госэнергоподзора и Технического отдела МЭС № 45/139/Э от 15/XII 1949 г. В связи с этим необходимо иметь в виду разъяснение Президиума Правления ВНИТОЭ от 30 июля 1952 г., в котором на основании новых данных об эффективности синхронизации уже установленных асинхронных двигателей отмечается возможность применения синхронизации только в тех случаях, когда применение других способов невозможно.

В новой шкале скидок и надбавок, утвержденной 1 сентября 1952 г., повышение коэффициента мощности путем синхронизации асинхронных двигателей учитывается как мероприятие, менее экономичное с точки зрения народного хозяйства, и поэтому размер скидок за повышение коэффициента мощности этим способом снижен. По той же причине синхронизация допускается только с разрешения энергосистемы.

Следует остановиться на предложении, выдвигаемом некоторыми специалистами, о целесообразности выпуска комбинированных двигателей, совмещающих в себе преимущества асинхронных двигателей с фазным ротором и нормальных синхронных двигателей.

Рассмотрим, зачем нужны такие двигатели.

В настоящее время можно утверждать, что нет таких приводов, для которых по условиям их пуска не могли бы быть применены асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором или синхронные двигатели. Практика показывает, что применение таких двигателей для механизмов с жесткими условиями вполне допустимо.

В качестве примера можно привести шаровые мельницы, дробилки, экскаваторы, компрессоры и подобные механизмы, для которых весьма успешно применяются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные двигатели, в то время как несколько лет назад это считалось невозможным. Установка асинхронных двигателей с фазным ротором, применяемая в настоящее время заводами для некоторых типов компрессоров, быстропадающих щитов на гидростанциях и др., свидетельствует только о нежелании этих заводов отойти от привычных для них решений. На ДнепроГЭС отказались от пуска двигателей с фазным ротором при помощи реостата и успешно применяют прямой пуск с замкнутым ротором для быстропадающих щитов.

Если рассмотреть вопрос о допустимости применения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и синхронных двигателей с точки зрения снижения напряжения в сети при пуске, то в подавляющем числе случаев прямой пуск вполне допустим. В необходимых случаях может быть применен реакторный пуск.

Таким образом, область применения асинхронных двигателей с фазным ротором стала весьма ограниченной. Они могут применяться, как правило, только в тех приводах, которые требуют регулировки скорости. Но и в этих случаях можно применять и другие устройства для регулировки скорости, как, например, гидромуфты и т. п.

Выпускающиеся ранее комбинированные синхронно-асинхронные двигатели по своей конструкции отличаются от асинхронных двигателей с фазным ротором увеличенным воздушным зазором. Это повышает перегрузочную способность двигателя при работе в синхронном режиме. Кроме того, эти двигатели выполняются с двухфазной обмоткой ротора для удобства питания постоянным током.

Появление комбинированных двигателей было оправдано в свое время (начало XX в.) тем, что пусковые характеристики синхронных двигателей были неудовлетворительны. В связи с усовершенствованием синхронных двигателей комбинированные двигатели потеряли свои преимущества. Те приводы, для которых раньше применялись эти двигатели, теперь успешно работают с синхронными двигателями (компрессоры, мельницы и др.).

По стоимости комбинированные синхронно-асинхронные двигатели сопоставимы с нормальными синхронными двигателями. Производство комбинированных двигателей по постановлению первой конференции по электроприводу было прекращено в 1930 г.

Так зачем занимать нашу промышленность разработкой никому ненужных комбинированных двигателей, вместо того чтобы организовать выпуск в необходимом количестве нормальных синхронных двигателей с улучшенными параметрами? Предложение о выпуске комбинированных двигателей следует считать неправильным. Нужно выпускать нормальные синхронные двигатели в количествах, достаточных для удовлетворения потребностей народного хозяйства.

Преимущества синхронных двигателей в сравнении с синхронизированными по схеме ДАГ весьма наглядно видны из следующего примера.

На нефтепромыслах Азнефтедобычи производится замена асинхронных двигателей с фазным ротором синхронными двигателями, изготовленными по чертежам завода «Электросила». Данные синхронных двигателей: 217 квт; 6 кв;  $\cos \varphi = 0,8$ ; 750 об/мин; к. п. д. при номинальном режиме с учетом потерь в возбудителе 0,903. Двигатель имеет возбудитель на одном валу.

Для этого двигателя сложная схема пуска была заменена простой схемой прямого пуска с постоянно приключенным возбудителем, аналогичной схеме пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Как показали испытания, эти синхронные двигатели обеспечивают самозапуск после полной остановки за 5..7 сек.

С точки зрения удобства эксплуатации этот синхронный двигатель значительно проще и надежнее синхронизированного двигателя с фазным ротором по схеме ДАГ.

Рассмотрим теперь экономичность применения синхронного двигателя по сравнению с нормальным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

Согласно техническому справочнику на асинхронные электродвигатели серии АМ завода «Электросила» данные асинхронного двигателя следующие: 210 квт; 6 кв;

730 об/мин,  $\cos \varphi = 0,81$ , к. п. д. при номинальной нагрузке 0,905. Примем, что аналогичные данные имел бы двигатель на номинальную мощность, равную 217 квт.

При номинальной нагрузке асинхронный двигатель будет потреблять из сети активную мощность  $P_1 = \frac{239,8 \cdot 0,586}{0,905} = 239,8 \text{ квт}$  и реактивную  $P_p = \frac{239,8 \cdot 0,586}{0,81} = 174 \text{ квар}$ .

Соответственно для синхронного двигателя получили потребляемую активную мощность  $P_1 = \frac{217}{0,903} = 240,3 \text{ квт}$  и отдаваемую в сеть реактивную мощность  $P_p = \frac{240,3 \cdot 0,6}{0,8} = 180 \text{ квар}$ .

Таким образом, полный компенсирующий эффект от применения синхронного двигателя будет равен  $174 + 180 = 354 \text{ квт}$  при расходе активной энергии  $240,3 - 239,8 = 0,5 \text{ квт}$ . Это дает на 100 квт удельный расход  $\frac{0,5}{3,54} = 0,141 \frac{\text{квт}}{\text{квар}}$ , т. е. меньше, чем при применении статических конденсаторов, почти в 3 раза и, по меньшей мере, в 20 раз меньше, чем при синхронизации по схеме ДАГ.

Этот пример весьма убедительно показывает преимущество замены асинхронных двигателей синхронными двигателями вместо синхронизации их по схеме ДАГ.

В заключение считаю необходимым отметить, что некоторые специалисты выдвинули в последнее время новое положение о том, что к. п. д. синхронизированных асинхронных двигателей в ряде случаев выше, чем при работе в асинхронном режиме. При этом такое утверждение приводится голословно, без всяких доказательств. Следовало бы потребовать от сторонников этого взгляда результатов испытаний, подтверждающих, что действительно к. п. д. у некоторых синхронизированных двигателей выше при работе в синхронном режиме, чем при работе в асинхронном режиме.

**Выводы.** 1. Наиболее рациональным способом повышения коэффициента мощности является широкое применение нормальных синхронных двигателей и статических конденсаторов низкого и высокого напряжений.

2. Министерство электропромышленности должно обеспечить разработку и выпуск новых серий синхронных двигателей на широкий диапазон мощностей, в том числе выпуск синхронных двигателей малой и средней мощности на низком напряжении на базе синхронных генераторов инж. Таманцева. Необходимо обеспечить также выпуск в достаточных количествах статических конденсаторов высокого и низкого напряжений, резко повысив их качество. Это диктуется государственными интересами, и разрешение этого вопроса нельзя больше откладывать. При этом следует уменьшить выпуск асинхронных двигателей с фазным ротором за счет увеличения выпуска синхронных двигателей и асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

3. Повышение коэффициента мощности на действующих предприятиях должно осуществляться за счет повышения коэффициента мощности путем замены части установленных асинхронных двигателей синхронными, установкой статических конденсаторов и синхронизации части уже установленных асинхронных двигателей с фазным ротором. При этом область применения синхронизации асинхронных двигателей должна быть ограничена, учитывая опасность широкого внедрения таких двигателей с точки зрения устойчивости работы ответственных потребителей.

**Проф. П. Г. ГРУДИНСКИЙ**  
Москва

В практике эксплуатации промышленных установок нередко возникает необходимость определить эффективность относительно небольших изменений потребления реактивной мощности. Оценка обычным методом, путем сравнения двух вариантов режимов—до и после изменения,—не только требует большой затраты времени, но часто и практически невозможна, так как изменения могут быть одного порядка с точностью расчетов.

Для таких случаев Министерство электростанций рекомендует пользоваться методом экономического эквивалента реактивной мощности и определять эффективность

компенсации по формуле, в которой сопоставляются изменения ежегодных расходов в энергетической системе от уменьшения потерь при передаче энергии с отчислениями на погашение затрат потребителя на компенсирующую установку.

Рекомендуемый метод и формула встретили резкую критику со стороны Г. М. Бердичевского (Электричество, № 5, 1952). Автор не рассматривает принципиальной стороны метода, а применяет формулу для расчета двух примеров. Полученные результаты представляются ему явно неправильными, не соответствующими его представлениям, и он на этом основании заявляет об абсолютной непригодности формулы.

Анализ статьи Г. М. Бердичевского заставляет предполагать, что автор не вполне понимает сущность метода и при критике формулы исходит из ошибочных положений. Представляется целесообразным разъяснить эти ошибки и подтвердить правильность метода как средства быстро и с достаточной точностью оценить результаты мероприятий по компенсации реактивной мощности, явно не отражающихся на режиме системы.

Предварительно напомним основы метода экономического эквивалента реактивной мощности. Всякую цель передачи электрической энергии можно представить, как состоящую из ряда последовательно включенных элементов с сопротивлением  $R_i$  (ом). При протекании по такому элементу мощности  $S_i$  (квт) с составляющими  $P_i$  (квт) и  $Q_i$  (квар) при напряжении  $U_i$  (кв) потери мощности в данном элементе определяются по выражению

$$\Delta P_i = \frac{S_i^2 R_i}{1000 U_i^2} = \frac{P_i^2 R_i}{1000 U_i^2} + \frac{Q_i^2 R_i}{1000 U_i^2} \text{ [квт].} \quad (1)$$

Выражение (1) показывает, что потери при передаче активной и реактивной мощности можно вычислять независимо друг от друга.

Изменение потерь активной мощности в рассматриваемом элементе системы при незначительном изменении потребления реактивной мощности можно найти, проинфериенцировав выражение потерь (1) по  $Q$ :

$$\Delta \Delta P_i = \frac{2 Q_i R_i}{1000 U_i^2} \frac{\partial Q}{\partial Q} \left[ \frac{\text{квт}}{\text{квар}} \right]. \quad (2)$$

Изменение потерь активной мощности во всей цепи передачи от места производства реактивной мощности до места потребления при небольшом изменении потребления реактивной мощности на  $\Delta Q$  можно получить, суммируя выражения, аналогичные (2), для всех элементов цепи:

$$\Delta \Delta P = \Delta Q \sum \frac{2 Q_i R_i}{1000 U_i^2} = \Delta Q K_1 \text{ [квт].} \quad (3)$$

Здесь  $\sum \frac{2 Q_i R_i}{1000 U_i^2} = K_1 \frac{\text{квт}}{\text{квар}}$  — экономический эквивалент реактивной мощности, т. е. уменьшение потерь активной мощности при уменьшении потребления реактивной мощности на 1 кварт. Необходимо отметить, что экономический эквивалент вдвое больше средних удельных потерь активной мощности при передаче реактивной мощности. В этом легко убедиться, разделив потери, выражаемые последним членом уравнения (1), на реактивную мощность  $Q_i$ .

Экономический эквивалент реактивной мощности посчитывается для максимального значения реактивной нагрузки. Изучение большого числа графиков нагрузки показывает, что в суточном графике максимум реактивной нагрузки не совпадает по времени с максимумом активной, в период максимума активной нагрузки реактивная нагрузка составляет всего 80% своего максимального значения. Поэтому, если известен экономический эквивалент реактивной мощности  $K_1$ , удельные потери в компенсирующем устройстве  $K_c$  при выработке на месте реактивной мощности  $\Delta Q$ , то снижение потерь мощности в системе в максимум активной нагрузки получится из выражения

$$\Delta P = \Delta Q (0,8 K_1 - K_c) \text{ [квт],}$$

а снижение потерь энергии определится как снижение потерь мощности в максимум реактивной нагрузки, уменьшенное на время максимальных потерь (время потерь)  $\tau$ :

$$\Delta A = \Delta Q (K_1 - K_c) \tau \text{ [квтч].} \quad (5)$$

Таким образом, уменьшение потребления промышленным предприятием реактивной мощности на  $\Delta Q$  влечет за собой освобождение мощности станции, а следовательно, и снижение годовых амортизационных расходов на

$$\Delta Q (0,8K_1 - K_c) 2500 \cdot 6,5 \text{ руб/год} \quad (4)$$

и, кроме того, снижение расходов на топливо и его сжигание на

$$\Delta Q (K_1 - K_c) \tau \beta \text{ руб/год,} \quad (5)$$

где  $\beta$  — топливная составляющая стоимости электроэнергии, а 2500 руб.— стоимость установленного киловатта на станции. Установка компенсирующего устройства может считаться выгодной в том случае, если связанные с ней затраты окупаются в достаточно короткий срок. Этот срок принят в 5 лет, что в отношении синхронизированных двигателей объясняется быстрым износом селеновых выпрямителей, а для других компенсирующих устройств еще и тем, что ввиду принятой линии на переход от централизованного производства реактивной мощности к децентрализованному экономический эквивалент реактивной мощности из года в год снижается, вследствие чего подсчитанная по выражениям (4) и (5) экономия соответственно из года в год уменьшается. Компенсация реактивной мощности будет эффективной при условии:

$$\Delta Q \left[ \frac{2500 \cdot 6,5}{100} (0,8K_1 - K_c) + (K_1 - K_c) \tau \beta \right] \geq \frac{C_c}{5}, \quad (6)$$

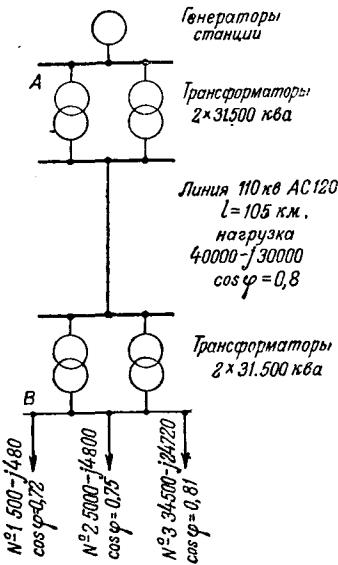
где  $C$  — стоимость компенсирующей установки (в руб.). В циркулярных письмах и директивных указаниях это выражение пишется в несколько ином виде, а именно обе его части делятся на  $\Delta Q$ . Эту формулу и критикует Г. М. Бердичевский.

В своей статье он рассматривает эффективность синхронизации двух асинхронных двигателей, которая уменьшает потребление реактивной мощности установкой на  $2 \times 105 \text{ квар}$ ; он предполагает, что такое мероприятие осуществлено на двух предприятиях, равно электрически удаленных от места генерирования реактивной мощности, т. е. для обоих предприятий  $K_1$  имеет одинаковое значение, принимаемое им равным  $0,12 \text{ квт/квар}$ . Первое предприятие потребляет  $500 \text{ квт}$  и  $480 \text{ квт}$ , следовательно, имеет  $\cos \varphi_1 = 0,72$ . Второе предприятие потребляет  $500 \text{ квт}$  и  $4800 \text{ квт}$ , следовательно его  $\cos \varphi_2$  также равен 0,72. Синхронизация двух двигателей в первом предприятии улучшает  $\cos \varphi_1$  с 0,72 до 0,88, а во втором—всего до 0,74. Экономический же эффект, подсчитанный по формуле (6) для обоих предприятий, получается одинаковым. Автор считает такой вывод неправильным, а следовательно, и формулу непригодной.

Покажем, что предположение Г. М. Бердичевского о влиянии на экономический эффект синхронизации к коэффициенту мощности той установки, в которой синхронизированы двигатели, а не величины изменения потребления реактивной мощности установкой, неправильны.

Для этого рассмотрим схему, изображенную на рисунке, при составлении которой предположено, что оба предприятия питаются от одной цепи, от которой питается и ряд других предприятий, совокупно обозначенных для простоты предприятием № 3. Такое предположение вполне закономерно, так как Г. М. Бердичевским для обоих предприятий принято  $K_1 = 0,12$ . Примерно такая величина получается, если предприятия питаются по линии  $110 \text{ кв}$  с проводами АС-120 длиной 105 км с нагрузкой  $40000 \text{ квт}$  при  $\cos \varphi = 0,8$  с трансформаторами на обоих концах линии  $2 \times 31500 \text{ квт}$ .

Легко видеть, что снижение потерь при передаче от А до В (рисунок) зависит только от того, насколько изменится реактивная нагрузка в цепи передачи, и не зависит от того, у кого из потребителей № 1, 2, 3 будут синхронизированы двигатели; хотя и изменение потребления реактивной мощности у каждого из них на  $2 \times 105 \text{ квт}$



по-разному отразится на их  $\cos \varphi$ : у потребителя № 3 коэффициент мощности практически останется тем же, у № 2 возрастет с 0,72 до 0,74, а у № 1 достигнет значения 0,88.

Таким образом, Г. М. Бердичевский для суждения о пригодности формулы исходил из неправильного критерия, и в этом его первая ошибка.

Если бы все три предприятия или одно из них включили в работу такое количество компенсирующих установок, что реактивная мощность, передаваемая по цепи AB, изменилась бы заметно, то для расчета нужно было бы применять другой метод, а при расчете эффективности следующих установок небольшой мощности необходимо было бы принимать другое, меньшее значение  $K_1$ . Именно поэтому энергетические системы обязаны каждый год подсчитывать значения экономических эквивалентов для характерных точек систем.

Вторая ошибка в статье Г. М. Бердичевского состоит в том, что он считает необходимым при оценке экономии принимать для  $\beta$  не топливную составляющую, а дополнительную плату по тарифу. Другими словами, он предлагает считать, что с изменением потребления реактивной мощности в результате синхронизации двух двигателей по 117 квт в системе изменяются расходы на ремонты, обслуживание, на управлений аппарат и т. д., чего на самом деле не будет. Напомним, что в самой методике применения экономического эквивалента реактивной мощности лежит принцип учета изменений расходов:  $K_1$  является изменением потерь активной мощности при изменении потребления реактивной мощности на 1 квт;  $C$  — дополнительные расходы на синхронизацию двигателя; стоимость же самого двигателя и расходы по его эксплуатации не учитываются и т. д. Было бы поэтому неправильно в стоимость энергии включать те составляющие расходов, на которые синхронизация двигателей не влияет.

Г. М. Бердичевский делает и третью ошибку, когда считает неправильным учет несовпадения максимума нагрузки системы и максимума потерь мощности при передаче реактивной энергии. Известно, что себестоимость энергии для данного потребителя зависит от того, какую мощность потребляет этот потребитель в максимум нагрузки. Чем меньше он участвует в максимуме, тем дешевле будет себестоимость энергии, поскольку снижается составляющая, соответствующая амортизационным отчислениям.

Исходя из этого положения, стоимость киловаттчаса потерь при передаче реактивной мощности, максимум которых только на 80% участвует в максимуме системы, должна оцениваться дешевле, чем киловаттчас в компенсирующей установке, максимум которых полностью совпадает с максимумом нагрузки системы.

Четвертая ошибка Г. М. Бердичевского состоит в том, что в своей статье он не делает разницы между числом часов использования максимума потерь (время потерь), принимаемым в критикуемой им формуле разным 3000 час

в год, продолжительностью использования максимума нагрузки (если время потеря равно 3 000 час, то продолжительность использования — около 5 000 час в год) и числом часов включения, которое, естественно, больше числа часов использования максимума нагрузки. Эта ошибка приводит к тому, что он видит противоречие в двух директивных документах, где этого противоречия нет.

Наконец, нельзя не признать ошибкой предложение об отказе в пользовании методом экономического эквивалента реактивной мощности на том основании, что значение этого коэффициента изменяется в течение суток. Себестоимость киловаттчаса подвержена еще большим изменениям — она меняется в зависимости от часа суток, от того, какие станции работают, она различна для потребителей с разным числом часов использования максимума; тем не менее мы без всяких колебаний пользуемся усредненными цифрами. Такое же усреднение вполне закономерно и для экономического эквивалента.

Метод экономического эквивалента является единственным целесообразным методом для оценки экономической эффективности мероприятий по уменьшению потребления реактивной мощности отдельными приемниками потребителей или установками потребителей в целом, если изменения потребления невелики, например, в пределах 10...5% всей реактивной мощности, требующейся данной установке. Подсчеты по этому методу просты и дают результаты, достаточно точные.

Критика Г. М. Бердичевского основана на непонимании им сущности метода и продиктована желанием расширить пределы применения синхронизации асинхронных двигателей, рассматривать эту синхронизацию как универсальное средство. Между тем, признавая большое значение синхронизации двигателей для установок потребителей, удаленных от точек системы, где генерируется реактивная мощность, в отношении повышения напряжения и снижения потерь в сетях следует все же признать наличие у этого мероприятия ряда недостатков, ограничивающих его применение в сетях, питающихся непосредственно от электрических станций на генераторном напряжении. В подобных условиях затраты на синхронизацию не окупаются сокращением потерь в сетях; остается неоправданный расход на селеновые выпрямители — дорогой элемент устройства с очень малым сроком службы; увеличение числа синхронизированных двигателей повышает угрозу массового перехода их на асинхронный режим при толиках напряжения в сети, что резко увеличивает потребление реактивной мощности и, следовательно, может губительным образом отразиться на устойчивости системы.

Стремление расширить область применения синхронизированных двигателей имеет источником существующую систему штрафов за низкий коэффициент мощности, не учитывающую удаленность установки потребителей от источников, генерирующих реактивную мощность. Эта тарифная шкала не способствует правильному размещению и использованию компенсирующих средств. Между тем правильное размещение компенсирующих устройств особенно важно при их недостатке: каждое компенсирующее средство даст в десять и более раз больший эффект, если оно включено в глубине и на периферии системы, а не вблизи электрических станций.

**Инж. М. С. ЛИХАЧЕВ**  
Москва

При рассмотрении методов повышения  $\cos \varphi$  не следует отставать исключительность одного из известных методов. Вопрос повышения  $\cos \varphi$  настолько важен, что все экономически целесообразные способы компенсации реактивной энергии должны найти применение в соответствующих условиях. Однако некоторые ведомственные энергетики, уверовавшие в непогрешимость статических конденсаторов или синхронных двигателей, никак не могут согласиться с тем, что следует использовать и другие доступные и дающие реальные результаты способы компенсации реактивной энергии.

Такое противовставление синхронных двигателей или статических конденсаторов синхронизированным двигателям мы полагаем в корне неверным. Такая постановка вопроса уводит в сторону от решения важнейшей государственной задачи — повышения  $\cos \varphi$ .

Наоборот, энергетики промышленности, работники эксплуатации, широко применяющие синхронизацию асинхронных двигателей и получающие совершенно реальный эффект в киловольтамперах высвобожденной трансформаторной мощности и в киловатах уменьшения потерь активной мощности, не противопоставляют синхронизацию асинхронных двигателей применению синхронных двигателей или статических конденсаторов.

Схема ДАГ дала возможность синхронизировать большое количество асинхронных двигателей с фазным ротором, которые широко используются в ряде отраслей промышленности. Энергетики угольной, нефтяной и других отраслей промышленности усиленно взялись за превращение асинхронных двигателей из крупных потребителей реактивной энергии в ее производителей, справедливо рассудив, что если есть асинхронный двигатель с фазным ротором, то его надо синхронизировать, если есть синхронный двигатель, то надо его использовать.

Примером может служить большое количество нефтяных объединений и угольных комбинатов. Например, в комбинате Стальнуголь синхронизировано 178 асинхронных двигателей мощностью 46 тыс. квт, которые обеспечивают сокращение потребления из сети 26 тыс. квт реактивной энергии (58 двигателей являются резервными). Эта работа проделана за последние 3—4 года, и за это же время в этом крупнейшем в стране угольном комбинате введено в действие только несколько синхронных двигателей, несмотря на то, что угольная промышленность имеет приоритет в получении их. В этом конкретном случае синхронизация явилась ключом для решения проблемы повышения  $\cos \varphi$  так как удельный вес синхронизированных двигателей составил 27% мощности всех средств, служящих для повышения  $\cos \varphi$ , а удельный вес синхронных двигателей (с учетом всех ранее установленных) составляет всего 10%.

К тому же синхронизация двигателя мощностью 100...150 квт — вполне освоенное и недорогое дело, а синхронный двигатель такой же или вдвое большей мощности — это дорогая и сложная машина с машинным возбудителем, по сути дела агрегат из двух машин. Следует также иметь в виду, что в последнее время синхронизированные асинхронные двигатели стали успешно применять для регулируемого привода, например для привода подъемных машин наклонных шахт (см. статью Скоркина, Электричество, № 5, 1952, стр. 52). А использование синхронных двигателей для этой цели затруднено вследствие необходимости применения достаточно мощных гидромуфт. Следовательно, приходится считаться с тем, что имеется большая группа машин, приводимых мощными асинхронными двигателями с фазным ротором. Вообще, о какой государственной целесообразности можно говорить, если противники применения синхронизации предлагают сдать в архив громадное количество мощных асинхронных двигателей, успешно работающих в промышленности, и заменить их выпускающимися в очень небольших количествах синхронными двигателями, идущими в основном на привод новых устанавливаемых механизмов.

Противники синхронизации считают свою точку зрения «объективной», а точку зрения тех, кто с ними не согласен, — неправильной и обычно обвиняют своих оппонентов в не всегда безупречном отражении состояния вещей. Эти заявления никогда и ничем не подтверждаются: люди, проводящие синхронизацию, публикуют результаты проделанной работы и приводят данные о фактических измерениях на десятках двигателей и об экономическом эффекте, выраженным в рублях и киловаттчасах; противники синхронизации ничего пока не сделали для того, чтобы убедить в правильности своих отрицательных суждений о синхронизации.

Получается весьма интересная картина. Энергетики и организации, применяющие синхронизацию и имеющие в этом деле опыт (синхронизировано более 700 двигателей), пишут и говорят о положительных результатах ее применения и о том, что полученные на практике технико-экономические показатели ставят синхронизированные двигатели в один ряд с синхронными, а лица, которые никогда синхронизацией на деле не занимались, не видевшие этой работы и не анализировавшие ее результатов, заявляют о сомнительности представляемых данных, хотя никаких для этого оснований у них нет.

Небезинтересно, что противники синхронизации не всегда были такого дурного мнения об этом методе повышения  $\cos \varphi$ . Так, Госиспекция по энергонадзору в своем циркулярном письме № 32-201 от 18 июня 1947 г. писала: «Синхронные и синхронизированные двигатели, несущие (активную) механическую нагрузку и работающие в индуктивном квадрате с коэффициентом мощности до 1 включительно, увеличивая естественный средневзвешенный коэффициент мощности предприятия, входят в его определение», т. е. предлагается рассматривать синхронизацию как метод повышения естественного  $\cos \varphi$ , наравне с синхронными двигателями. Позднее, после распространения схемы ДАГ, точка зрения представителей Госэнергонадзора почему-то резко изменилась.

Один из наиболее ярых противников синхронизации Л. В. Литвак ранее даже считал необходимым создание схемы, подобной схеме ДАГ, когда писал в своей статье «Опыт синхронизации асинхронных двигателей» (Электрификация и электромонтер, № 2—3, 1933) следующее:

«Надежность рассмотренной схемы синхронизации может быть еще повышена путем автоматизации перехода двигателя с синхронного режима на асинхронный в случае выпадения двигателя из синхронизма вследствие перегрузки или повреждения в цепи постоянного тока. Рядом организаций такие автоматы уже сконструированы, и остается только выразить пожелание о скорейшем их использовании в промышленных установках».

Это пожелание Л. В. Литвака выполнено и перевыполнено, так как схема ДАГ обеспечивает не только автоматический переход двигателя на асинхронный режим при его выпадении из синхронизма, но также и автоматическое возвращение его в синхронизм, когда причина выпадения устранена. Это не мешает в настоящее время Л. В. Литваку окжесточенно нападать на синхронизацию.

Синхронизация по схеме ДАГ дает возможность двигателю одинаково устойчиво работать как в синхронном, так и в асинхронном режимах в зависимости от нагрузки на валу и режима напряжения в питающей сети. Если двигатель не может удержаться в синхронизме, он будет продолжать работу как асинхронный и автоматически войдет в синхронизм тогда, когда это станет возможным. В этом основное преимущество схемы ДАГ перед всеми существовавшими до нее схемами синхронизации, и трудно представить себе, чтобы противники синхронизации и, в частности, Л. В. Литвак не знали этого.

Обычные ссылки на решение Госэнергонадзора и Технического отдела МЭС № 45/139/Э от 15/XII 1949 г. по вопросу синхронизации только запутывают вопрос, так как упомянутое решение само по себе является порочным и неверно ориентирует энергетиков в вопросе применения синхронизации. В заключении научно-экспертной комиссии под председательством акад. Г. М. Кржижановского (май 1950 г.) сказано: «1. Рекомендовать применение системы ДАГ во всех тех случаях, когда асинхронные двигатели с контактными кольцами пытаются не менее чем через две трансформации, а также тогда, когда экономический эквивалент реактивной мощности в месте установки двигателя превышает величину порядка 0,07. 2. Рекомендовать Министерству электростанций СССР разработать на основе этого заключения новое положение<sup>2</sup> о применении синхронизации асинхронных двигателей по схеме ДАГ и опубликовать это положение в журнале «Промышленная энергетика».

Очевидно, этих предложений авторитетной комиссии недостаточно для убеждения противников синхронизации, они продолжают ссылаться на оправданное жизнью и ничем не оправданное ошибочное решение.

Резюмируя, можно сказать, что трехлетняя работа 700 мощных асинхронных двигателей, синхронизированных по схеме ДАГ, является наиболее веским и действенным аргументом в пользу применения синхронизации как метода повышения  $\cos \varphi$ . Полученный экономический эффект свидетельствует о том, что синхронизация является экономичным способом компенсации реактивной энергии, и за-

траты активной энергии на компенсацию реактивной энергии находятся в тех же пределах, что и у синхронных двигателей и у статических конденсаторов. Конференции и совещания, детально разбирающие вопросы синхронизации асинхронных двигателей как метод повышения  $\cos \varphi$ , высказались за применение синхронизации наравне со статическими конденсаторами и синхронными двигателями. Совещание энергетиков, организованное ВНИТОЭ в марте 1952 г. в Ленинграде, специально посвященное вопросу повышения  $\cos \varphi$ , в своей резолюции наряду с другими рекомендациями признало целесообразным распространить положительный опыт применения синхронизации уже установленных асинхронных двигателей по схеме ДАГ и просило Министерство электропромышленности организовать серийный выпуск синхронизационных устройств.

По нашему мнению, пора прекратить необоснованное сопротивление отдельных работников дальнейшему распространению синхронизации и применять все методы повышения  $\cos \varphi$ : статические конденсаторы, синхронные двигатели и синхронизацию асинхронных двигателей в условиях, наиболее благоприятствующих каждому из этих методов, и в кратчайшие сроки увеличить коэффициент использования электрических станций и сетей.

## Кандидат техн. наук, доц. Л. В. ЛИТВАК

Москва

Авторы схемы ДАГ и наиболее настойчивые сторонники этой схемы склонны видеть в этой схеме чуть ли не ключ к решению проблемы компенсации реактивных нагрузок для ряда отраслей промышленности и отдать предпочтение не синхронным, а синхронизированным асинхронным двигателям. К. И. Скоркин приходит, например, к такому выводу: «...Следует поставить перед электропромышленностью и научно-исследовательскими организациями вопрос о целесообразности производства асинхронных синхронизированных двигателей и о специальной разработке такого двигателя...». При чтении этих строк невольно возникают такие вопросы: Не ошибается ли К. И. Скоркин? Не будет ли более правильным ориентировать электропромышленность на такое расширение выпуска синхронных двигателей (а не синхронизированных), которое позволило бы заменить асинхронный двигатель синхронным в большинстве новых установок нерегулируемого электропривода при мощности, например, от 100 квт и выше?

К сожалению, дискуссия по схеме ДАГ не всегда способствовала установлению у промышленных энергетиков объективно правильной точки зрения по ряду вопросов, связанных с применением синхронизированных асинхронных двигателей; ряд опубликованных в различных периодических изданиях материалов об экономичности синхронизации, об устойчивости синхронизированного асинхронного двигателя, о достигнутых в результате синхронизации успехах — не всегда безуменно отражали фактическое положение вещей. Отсюда и та разноголосица, которая нередко слышится в ответах на поставленные выше — в связи с выводом К. И. Скоркина — вопросы, хотя ответить на эти вопросы можно только утвердительно.

К. И. Скоркин ошибается, выдвигая перед электропромышленностью задачу разработки и производства синхронизированных асинхронных двигателей. Данные прилагаемой таблицы показывают, что ведущие проектные организации поддерживают идею массового внедрения в народное хозяйство синхронных двигателей вместо применявшимся до сих пор асинхронных двигателей.

Постановка в настоящее время вопроса о разработке и производстве синхронизированных асинхронных двигателей могла бы быть оправдана лишь только в том случае, если бы можно было ожидать от синхронизированных двигателей лучших технико-экономических показателей, чем от синхронных двигателей. Но этого, как известно<sup>1</sup>, ожидать невозможно, так как и теоретически, и на практике доказано, что синхронным двигателям присущи более

<sup>1</sup> Речь идет о синхронизации восьми двигателей 44...110 квт машинным возбудителем на фабрике им. Сталина треста «Пестропан». (С. Л.).

<sup>2</sup> Вместо решения 45/139/Э.

<sup>1</sup> Из работ члена-корр. АН СССР М. П. Костенко, проф. Д. А. Завалишина и др.

высокие технико-экономические показатели, чем синхронизированным асинхронным двигателям. Отсюда приходится сделать вывод, что интересы народного хозяйства требуют от электропромышленности не выпускать синхронизированных асинхронных двигателей, а значительного расширения производства синхронных двигателей, которые должны в недалеком будущем заменить собой асинхронные двигатели в большинстве установок нерегулируемого привода мощностью от 100 квт и выше (см. таблицу).

*Механизмы мощностью от 100 квт и выше, у которых целесообразна замена приводного асинхронного двигателя синхронным (таблица составлена по данным ведущих проектных организаций, представленным в Госэнергоподзор в 1952 г.)*

Проектная организация	Название механизма
Центрогипрошахт Уралгипрошахт Днепрогипрошахт	Компрессоры, вентиляторы, насосы Компрессоры, вентиляторы, насосы Вентиляторные установки шахт и производственной вентиляции обогатительных фабрик, компрессорные станции, насосы технического и хозяйственного водоснабжения шахт и обогатительных фабрик
Гипроазот	Центробежные насосы, воздуходувки, поршневые компрессоры
Гипрохим	Турбовоздуходувки и вентиляторы, вакуумные жидкостные насосы, газовые компрессоры
Гипролегпром	Компрессоры, отбелочные агрегаты, насосы производственного и хозяйственного водоснабжения
Гипросахар	Компрессоры в холодильных установках, центробежные насосы на сахарных заводах
Гипрокислород	Компрессоры 3р-7/220, 2р-20/8, 2р-10/20, 160 в-20/8
Кривбасспроект	Оевые вентиляторы, компрессоры, дробилки сырой руды, шаровые и стержневые мельницы обогатительных фабрик, мощные поверхностные насосы для обогатительных фабрик
Резинопроект Гипро Министерства транспортного машиностроения	Вальцы, резиносмесители Компрессоры
Южгипроцемент	Шаровые, трубчатые мельницы для размола цемента и сырья, компрессоры
Гипромясомолпроект Гипроспиртвино	Аммиачные компрессоры
Уралгипроруда	Аммиачные холодильные машины, воздушные компрессоры, турбовоздуходувки, центробежные насосы
	Компрессоры, насосы подземных станций, вентиляторы вентиляционных установок, экскаваторы агломерационно-обогатительных фабрик

Иначе стоит вопрос, когда речь идет о синхронизации уже эксплуатируемых нормальных асинхронных двигателей с фазным ротором.

Заметим, что в свое время вопрос о сравнительной экономичности синхронизации был затронут нами в специальной статье<sup>2</sup>. Статья эта вовсе не была направлена против синхронизации. Приведенные в статье данные отно-

сительно минимально допустимых экономических эквивалентов реактивной мощности (при различных средствах компенсации реактивных нагрузок) свидетельствовали лишь о том, что применение нормальных синхронных двигателей (вместо асинхронных) или высоковольтных силовых конденсаторов является более эффективным мероприятием, чем синхронизация асинхронных двигателей.

Действительно, при высоковольтных силовых конденсаторах минимально допустимый экономический эквивалент реактивной мощности составляет величину порядка 0,034—0,38 квт/квар, при замене асинхронного двигателем синхронным — 0,04  $\div$  0,045 квт/квар, а при синхронизации по схеме ДАГ — 0,08  $\div$  0,09 квт/квар.

Эти данные показывают, что техническая политика в области повышения коэффициента мощности должна быть ориентирована отнюдь не в сторону синхронизации асинхронных двигателей, а по линии изготовления в достаточном количестве нормальных синхронных двигателей и силовых конденсаторов.

Таким образом, не касаясь даже других недостатков, органически присущих синхронизации (малая устойчивость двигателя в синхронном режиме при высоких нагрузках, наличие постоянно налагающих щеток в роторной цепи, характеризуемой относительно большими токами и др.), необходимо в свете изложенного признать, что синхронизация приобретает в настоящий момент значение как временно — хотя в ряде случаев и вполне целесообразное мероприятие, которое в будущем неизбежно должно будет уступить свое место применению синхронных двигателей и силовых конденсаторов, когда эти виды оборудования будут выпускаться отечественной промышленностью в количествах, полностью соответствующих все возрастающим запросам народного хозяйства.

Однако ни в коем случае нельзя из вышесказанного сделать тот неправильный вывод, что и в настоящий момент не следует прибегать к синхронизации асинхронных двигателей как средству компенсации реактивных нагрузок.

Как известно, Решение № 45/139/Э от 15 декабря 1949 г. Технического отдела МЭС и Госэнергоподзора указывает на возможности применения синхронизации в тех пунктах сети, где экономический эквивалент реактивной мощности превышает удельные затраты активной мощности на синхронизацию, т. е. там, где мероприятие это оправдывается экономически и необходимо с точки зрения баланса реактивной мощности в системе.

Теперь приведем несколько частных замечаний.

1. Как известно, максимальный вращающий момент синхронизированного двигателя весьма мало отличается от номинального вращающего момента. Это и определяет свою недостаточную устойчивость синхронизированного двигателя в синхронном режиме при нагрузках выше 70—75% номинальной мощности.

Между тем К. И. Скоркин указывает, что большинство синхронизированных двигателей на шахтах комбината «Сталинуголь» являются приводными двигателями вентиляторов, которые по мере развития работ в шахтах (за период от 3 до 5 лет) загружаются от 50 до 100% номинальной мощности.

Таким образом, исходя из равномерности развития, можно считать, что в течение 1,5—2 лет указанные двигатели загружаются до наибольшей нагрузки, рекомендуемой по «условию устойчивости», т. е. до 75% номинальной. Эксплуатация этих двигателей при дальнейшем росте нагрузки неизбежно будет сопровождаться (даже при автоматическом варианте схемы ДАГ) довольно частыми выпадениями из синхронизма при понижении напряжения в сети и сравнительно длительной работой в асинхронном режиме как раз в то время, когда сеть ощущает повышенную потребность в реактивной мощности.

Согласно официальному отчету Азэнерго от 28/11 1950 г., 22% общего числа установленных селеновых агрегатов не работали тогда из-за выпадения двигателей из синхронизма при полной нагрузке. К сожалению, эта сторона вопроса о правильном выборе объектов для синхронизации с точки зрения степени их загрузки совершенно не освещена в статье К. И. Скоркина, который считает, что «синхронизировать можно почти любой асинхронный двигатель мощностью, начиная от 80...90 квт».

<sup>2</sup> Л. В. Литвак. К вопросу об экономичности синхронизированных асинхронных двигателей. Промышленная энергетика, № 7, 1950.

2. Приведенные у О. П. Шишкина данные о влиянии синхронизации на уровень напряжения, на потери энергии в сетях и трансформаторах, на удлинение расстояния, на которое можно передавать мощность при напряжении 6 000 в и др., к сожалению, совершенно ничем в его статье не подтверждены и не обоснованы, что исключает возможность судить о качестве этих данных.

Вместе с тем, если судить об этих данных по другому утверждению О. П. Шишкина, что «...за все это время (т. е. за двухлетний период — Л. Л.) не было случая повреждения электродвигателей по причине синхронизации и т. д.», то может возникнуть в этом отношении некоторое сомнение.

Согласно официальным отчетным данным Азэнерго от 28/IX 1950 г. 12 синхронизированных двигателей (или 12% общего числа) не работали тогда из-за перегрева обмоток и повреждения щеточных аппаратов. Согласно официальным отчетным данным Мосэнерго от 5/X 1950 г. 36 агрегатов (или 36% общего числа установленных в системе) не работали тогда по разным причинам; согласно официальным данным Ростовэнерго от 3/X 1950 г. 10 агрегатов (или 46% общего числа установленных в системе) не работали по разным причинам; на шахте «Нежданная» в конце 1948 г. было синхронизировано 3 двигателя. У одного двигателя мощностью 390 квт после синхронизации сгорела роторная обмотка, которая после восстановления (всего через 10 дней) снова сгорела; на шахте «Пролетарская диктатура» в 1949 г. был синхронизирован двигатель 390 квт. Первое повреждение установки имело место в сентябре 1949 г., а второе (сгорание роторной обмотки) — в декабре 1949 г. Таких фактов, к сожалению, можно привести много. Эти факты свидетельствуют о том, что над повышением надежности в эксплуатации синхронизированных агрегатов следует еще много поработать.

3. В статье Г. М. Бердичевского «О формуле для определения рентабельности синхронизации асинхронных двигателей» имеется утверждение о непригодности критикуемой формулы (см. Решение Технического отдела МЭС и Госэнергонадзора за № 45/139/Э от 15 декабря 1949 г.), так как расчетные результаты, даваемые ею в отношении срока окупаемости, получаются одинаковыми, несмотря на то, что одни и те же синхронизированные двигатели берутся автором в различных сочетаниях (случай синхронизации одного двигателя, случай синхронизации двух двигателей) и при работе в разных энергосистемах. Следует заметить, что приведенное автором опровержение критикуемой формулы вызвано, повидимому, простым недоразумением.

В основу определения рентабельности по указанной формуле положено сопоставление затрат на синхронизацию со стоимостью сэкономленной активной мощности (от уменьшения потерь на передачу реактивной энергии от места ее выработки до потребителя).

Такой принцип определения рентабельности компенсирующих устройств, в том числе и синхронизации, позволяет, как известно, выявить оптимальный вариант размещения компенсационного оборудования между различными потребителями реактивной энергии и, следовательно, ответить общеизвестной постановке вопроса.

В разобранном Г. М. Бердичевским примерах прията одинаковая величина экономического эквивалента реактивной мощности ( $k_1 = 0,12$ ), и величина сэкономленной активной мощности от уменьшения потерь на передачу реактивной мощности (при синхронизации одного двигателя — 105 квар, а двух двигателей — 210 квар) должна получиться одинаковой для систем как Белоруссэнерго, так и Армэнэнерго, ибо в целях упрощения приближенных экономических расчетов стоимость одного установленного киловатта для всех станций принята одинаковой и равной 2500 руб/квт. Поскольку и удельные затраты на синхронизацию в обоих примерах принятые также одинаковыми (равными 80 руб/квар), то и срок окупаемости синхронизации должен получиться одинаковым (3,6 года) для всех случаев, рассмотренных автором указанной статьи.

Таким образом, примеры Г. М. Бердичевского не опровергли критикуемую им формулу, а наоборот, подтвердили полную ее пригодность для приближенных определений рентабельности по усредненным технико-экономическим показателям.

## Доктор техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

Москва

Освещение вопроса в опубликованных статьях односторонне.

Указывается, например, на бесперебойность работы установок с переменной, колеблющейся нагрузкой, но не приводятся данные об отношении фактической нагрузки машины к мощности установленного двигателя, иначе говоря, данные о запасе мощности двигателя. Перечисляются суммы экономии, в то же время обходится вопрос о размерах капиталовложений на синхронизацию. Не учитываются и другие обстоятельства, о которых сказано ниже, что приводят к неправильным выводам в пользу системы ДАГ.

Схема синхронизации ДАГ имеет некоторое распространение на практике, но целесообразность ее не получила всеобщего признания.

В статьях и в ряде ведомственных трудов и экспериментальных заключений по схеме ДАГ фигурируют противоречивые расчеты годовой экономии и технико-экономические выводы. Эти технико-экономические оценки и выводы являются зачастую весьма условными и спорными, с одной стороны, ввиду весьма большого числа исходных факторов (мощности двигателей, графики нагрузки и коэффициент использования, продолжительность амортизационного срока, стоимости активной и реактивной энергии, стоимости агрегатов и пр.), а с другой стороны, вследствие ряда неточностей и полемических преувеличений, допускаемых как приверженцами, так и противниками схемы ДАГ.

Однако, если отбросить все неточности и полемические преувеличения, а также факторы временного характера, то можно на основе органических свойств схемы ДАГ сформулировать относительно этой схемы некоторые положения:

1. Применение выпрямительных агрегатов взамен вращающихся машин в качестве возбудителей для синхронизации асинхронных двигателей в принципе ничего не меняет и экономичности синхронизации не повышает: к. п. д. выпрямительного агрегата — того же порядка, что и у вращающегося возбудителя, а стоимость выпрямительного агрегата — в 2..3 раза выше стоимости вращающегося возбудительного агрегата.

2. Подсчеты экономичности схемы ДАГ, выполняемые ее защитниками, носят односторонний характер: они исходят из постоянной, не меняющейся нагрузки в 100%, тогда как итоги подсчетов сильно зависят от графика нагрузки (нужно пользоваться интегральным эффектом за длительный период времени).

3. При осуществлении синхронизации асинхронных двигателей по схеме ДАГ или иной схеме расход активной энергии повышается, так как:

а) Мощность возбуждения поступает из сети с потерями в выпрямительном агрегате (к. п. д. которого порядка 0,7..0,75).

б) Мощность возбуждения остается неизменной и при колебаниях нагрузки и уменьшении ее, вплоть до холостого хода.

4. Всегда имеют место повышенный нагрев одной фазы ротора и повышенный износ ее изоляции, что вызывает сокращение срока службы двигателя.

5. Всегда понижается перегрузочная способность двигателя; его опрокидывающий момент следует считать не выше  $M_{\max} = (110-115) \%$  от  $M_{\text{ном}}$ . Следовательно, запас устойчивости, являющийся обязательным для каждого приводного двигателя, существенно понижается, что сказывается особенно неблагоприятно при переменной нагрузке на валу двигателя и при колебаниях напряжения в сети, например при пусках соседних короткозамкнутых двигателей.

6. Наличие автомата в цепи ротора не компенсирует потерю в запасе устойчивости, так как переход двигателя при перегрузках в асинхронный режим сопровождается значительными толчками нестационарных токов и повышенным износом переключающего автомата — контактора, коммутирующего токи ротора в сотни ампер. Работа агрегата становится неспокойной, тогда как асинхронный двигатель выдерживает толчки момента в 200% и более без повреждения и незаметно для обслуживающего персонала.

7. Надежность эксплуатации синхронизированного двигателя вследствие усложнения установки всегда пони-

жаются, особенно если принять во внимание положения 4, 5 и 6.

Указанные свойства схемы ДАГ исключают ее применение для приводов с неизменной, колеблющейся нагрузкой и правильно (без запаса по мощности) выбранными двигателями. Поэтому правильность рекомендации схемы ДАГ и для асинхронных приводов шахтных подъемных машин (в статье К. И. Скоркина) вызывает большие сомнения.

Авторы схемы ДАГ рекомендуют ее преимущественно для приводов с постоянной нагрузкой — насосов, вентиляторов, компрессоров и т. п. Однако именно в этих случаях безусловно более целесообразно применять синхронные двигатели как с точки зрения экономичности улучшения  $\cos \varphi$ , так и по эксплуатационной надежности. Таким образом, область, где можно было бы ставить вопрос о применении схемы ДАГ, представляется достаточно узкой.

В статьях содержится ряд неправильных положений и выводов.

Указывается (в статье К. И. Скоркина), что «выпуск синхронных двигателей до сих пор еще весьма ограничен и получение их затруднительно» и что «синхронные двигатели могут быть получены только относительно мощные (от 500 квт и выше)». Однако вместо того чтобы сделать отсюда правильный вывод о необходимости развития производства синхронных двигателей и расширения их диапазона мощностей вниз, формулируется вывод о специальной разработке синхронизированных асинхронных двигателей и о постановке соответствующих исследовательских работ. Такую рекомендацию следует признать ненадлежащую и неправильно ориентирующую электромашиностроение.

В статье К. И. Скоркина отмечается более высокий расход активной энергии на синхронизацию асинхронных двигателей, чем расход энергии статическими конденсаторами. Но здесь же автор путем неправильных предпосылок стремится убедить в равнозначности обоих этих средств

по потерям энергии, ввиду того что «как правило, статические конденсаторы устанавливаются на подстанции, а синхронизированные двигатели присоединены на конце линий». Очевидно, что сравнение нужно вести в одинаковых условиях, тем более, что статические конденсаторы являются наиболее подходящим средством для индивидуальной, децентрализованной компенсации и могут устанавливаться именно в конце линии, непосредственно у двигателей на полу, или над ними на кронштейнах, металлических фермах под крышей и подобных местах.

Приведенные выше соображения позволяют сделать следующее заключение:

1. Улучшение  $\cos \varphi$  электрической установки никогда не является самоцелью (улучшение  $\cos \varphi$  не должно осуществляться «во что бы то ни стало» и любым способом), а является лишь средством для повышения экономичности электрической установки при разумно сбалансированной затрате материальных средств.

Синхронизация асинхронных двигателей этому принципу не удовлетворяет, так как при ее осуществлении достигаемые результаты не окупают затрат (первоначальных, по потерям энергии, а также по причине понижения надежности эксплуатации).

2. Применение схемы ДАГ не может рассматриваться как массовое рационализаторское мероприятие или техническое средство государственного масштаба, а только как вынужденное решение, допустимое в отдельных установках в случаях особо острого положения с реактивной энергией. Кроме того, это решение будет сохранять временный характер впредь до расширения производства синхронных двигателей и статических конденсаторов.

3. Установка синхронных двигателей с опережающим  $\cos \varphi$ , а также статических конденсаторов является средством улучшения  $\cos \varphi$ , качественно и экономически много превосходящим синхронизацию асинхронных двигателей.

## ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА

### ТРАМВАЙ В ДНЕПРОПЕТРОВСКЕ ПУЩЕН В 1897 г.

В книге Б. Н. Ржонсницкого «Трамвай — русское изобретение»<sup>1</sup> на стр. 54 неправильно указана дата пуска трамвая в Днепропетровске (Екатеринославе) 14 июня 1898 г. В действительности еще в 1897 г. электрическим трамваем в Екатеринославе было перевезено свыше двух миллионов пассажиров. Екатеринославский трамвай имел три маршрута; главный маршрут проходил по Екатеринин-

скому проспекту. В эксплуатации в том году находилось 17 закрытых и 9 открытых вагонов.

**Н. Е. ГАВРИЛЕНКО**  
Председатель Днепропетровского городского Исполнительного комитета депутатов трудящихся

**В. В. ОЛЕЙНИК**  
Директор Днепропетровского трамвайно-троллейбусного управления

**Д. Б. ЛОМАЗОВ**  
Зав. кафедрой электротехники Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта

<sup>1</sup> Издание Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1952.

### ОТ АВТОРА КНИГИ

Приведенное выше письмо правильно вскрывает незамеченную мною и издательством опечатку. Датой пуска Днепропетровского трамвая следует считать 14 июня 1897 г.

В указанной в примечании к табл. 1 на стр. 54 моей книги газете «Екатеринославские губернские ведомости»

за 15 июня 1897 г., № 128, стр. 4, в хронике можно прочитать следующее.

«Вчера состоялось... открытие пассажирского движения по главным ее (т. е. электрической городской железной дороги — Б. Р.) линиям...».

*Кандидат техн. наук Б. Н. РЖОНСНИЦКИЙ*



## О МЕТОДИКЕ ИЗЛОЖЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ВОПРОСОВ В КУРСАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

(Электричество № 11, 1952)

В заметке Л. И. Столова правильно ставится вопрос о необходимости единой трактовки в учебных курсах принципов работы электрических машин и выражающих их зависимости. Объяснение, на первый взгляд, совершенно различных формул и их обобщение позволяют лучше освоить материал курса и глубже проникнуть в физическую сторону процесса. Это положение относится в одинаковой степени к курсам как электрических машин, так и электро-привода. Ниже затронуты такие вопросы, которые нуждаются в обобщенном, едином изложении.

*Выражение для э. д. с. электрических машин.* Сообщения Л. И. Столова о едином выражении для э. д. с. машин постоянного и переменного тока

$$E = 4,44 k \omega f \Phi$$

следует дополнить указанием, что это же выражение относится и к трансформаторам и к коллекторным машинам трехфазного тока при надлежащем выборе в нем числового коэффициента.

*Выражения для механических характеристик двигателей.*

Механические («шунтовые») характеристики двигателей принято представлять следующими выражениями: для двигателей постоянного тока при постоянном магнитном потоке

$$n = \frac{U - IR}{C \Phi}, \quad (1)$$

для асинхронных двигателей

$$\frac{s}{s_n} = \frac{M}{M_n} = \text{пост.} \quad (2)$$

Как видно, между выражениями (1) и (2) нет никакого сходства.

Понятием скольжения, как мерой относительного снижения скорости, пользуются почти во всех учебных руководствах (за редкими исключениями) только применительно к асинхронным двигателям. Однако, если ввести это понятие и для двигателей постоянного тока, то легко показать полную тождественность выражений (1) и (2). Действительно, применяя (1) к случаю идеального холостого хода, имеем:

$$n_0 = \frac{U}{C \Phi}. \quad (3)$$

Разделив почленно (1) на (3), получаем:

$$\begin{aligned} \frac{n}{n_0} &= 1 - \frac{IR}{U} = 1 - \frac{I}{I_n} \frac{I_n R}{U} = 1 - \frac{\Phi I}{\Phi I_n} \frac{U - E}{U} = \\ &= 1 - \frac{M}{M_n} \frac{UI - EI}{UI} = 1 - \frac{M}{M_n} \cdot \frac{Mn_0 - Mn_n}{Mn_0} = \\ &= 1 - \frac{M}{M_n} s_n. \end{aligned} \quad (4)$$

Но левая часть равенства (4) может быть представлена так:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{n_0 (1 - s)}{n_0} = 1 - s. \quad (5)$$

Сопоставляя (4) и (5), получаем и для двигателя постоянного тока приведенное в начале равенство (2). Нуж-

но заметить, что пользование понятием скольжения дает, вообще, плодотворные результаты во многих вопросах исследования электроприводов постоянного тока. Полезно, наряду с изложенным выводом, получать выражение (2) непосредственно из графического изображения механической характеристики двигателя постоянного тока  $n = f(M)$  на основании подобия треугольников.

*Электродвигатели с регулированием скорости.* До сих пор не существует единого способа для обозначения пределов регулирования скорости, что приводит к недоразумениям, тем более, что способ обозначения тесно связан и с самим способом регулирования. На практике существует по крайней мере четыре способа указания пределов регулирования.

1. Указываются значения наивысшей и наименьшей скорости вращения (об/мин), причем они разделяются косой чертой — в случае многоскоростных двигателей, и прямой чертой — в случае регулирования реостатом, т. е. с промежуточными скоростями.

Примеры: 10 квт, 1500/750 об/мин (асинхронный двигатель с переключением полюсов); 10 квт, 1500—750 об/мин (асинхронный двигатель с реостатом в цепи ротора). Следует, однако, заметить, что косая чертотка применяется иногда в ином смысле — для указания границы разнородных способов регулирования, например, у двигателей постоянного тока для блумингов: 7000 л. с., 0/50/120 об/мин (регулирование от 0 до 50 об/мин по системе генератор-двигатель, от 50 до 120 об/мин изменением магнитного потока).

2. Указывается отклонение от основной скорости вращения в процентах.

Примеры. Асинхронный двигатель 10 квт, 1500 об/мин с сопротивлениями в цепи ротора для регулирования на —50% (вниз); двигатель постоянного тока 10 квт, 1500 об/мин с регулированием на +25% (вверх, т. е. магнитным потоком).

3. Отношение наименьшей скорости вращения к наибольшей обозначается в виде дроби с числителем, равным единице.

Примеры. Двигатель постоянного тока 10 квт, 1500 об/мин с регулированием 1:1,25 (т. е. вверх — магнитным потоком). Этот способ обозначения применяется главным образом для широких пределов регулирования — 1:10, 1:100 и т. д. Для многоскоростных асинхронных двигателей знак деления «:» иногда заменяется косой чертой, и тогда получается такое обозначение — асинхронный двигатель 10 квт, 1500 об/мин с регулированием 2/1 (т. е. переключением полюсов).

4. Наибольшая или, соответственно, наименьшая скорость вращения указывается в процентах от основной номинальной скорости, принятой за 100%.

Примеры. Асинхронный двигатель 10 квт, 1500 об/мин с регулированием 100...50% (реостатом в цепи ротора); двигатель постоянного тока 10 квт, 1500 об/мин с регулированием 100—125% (магнитным потоком); коллекторный двигатель трехфазного тока 10 квт, 1500 об/мин с регулированием 120...30% (перестановкой щеток); асинхронный двигатель 10 квт, 1500 об/мин с регулированием 100/50% (переключением полюсов).

Наиболее универсальным способом обозначения следует считать способ 4) в сочетании со способом 3) для случаев очень широкого диапазона регулирования. Ознакомление учащихся со способами обозначения пределов регулирования следует производить одновременно с рассмотрением самих способов и систем регулирования скорости.

Доктор техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

# По страницам технических журналов

## МЕСТНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ДУБЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ

Необходимость дублирования мощности в местной электроэнергетической системе возникает в определенных условиях электроснабжения, в частности когда в отдельные сезоны года может происходить особенно заметное снижение мощности сельских гидроэлектростанций. Так может случиться в районах нового орошения в зоне великих сталинских строек коммунизма, когда во время отъема воды для орошения мощность гидроэлектростанций на небольших реках, работающих в сочетании с крупнейшими гэс, может значительно уменьшиться.

По мнению автора, дублирование мощности в системах необходимо и в некоторых других районах страны, характеризующихся общим дефицитом местных энергетических ресурсов всех видов, когда целесообразно возможно интенсивнее использовать энергию небольших рек путем значительного повышения установленной мощности гидроэлектростанций ( $f$ ) и показателя использования энергии реки  $h$  и тем самым в максимальной степени снизить расход топлива на тепловых электростанциях.

В статье рассмотрены принципиальное содержание и метод построения энергетической характеристики местной электроэнергетической системы при любых заданных условиях дублирования мощности. Эти условия определяются показателями  $Z$ ,  $\zeta$  и  $X_{\Gamma-\Delta}^N$ .

Показатель дублирования мощности ( $Z$ ) в системе понимается как отношение суммы генерирующих мощностей к годовому максимуму системы  $K_c$  и определяется формулой (всегда  $Z > 1$ )

$$Z = \frac{K_{\Gamma Y} + K_{TY}}{K_c} = \frac{(f + g) \bar{K}}{f \bar{K}} = \left(1 + \frac{g}{f}\right) X_{\Gamma}^N.$$

Показатель полноты дублирования тепловой мощности в системе  $\zeta$  понимается как относительное выражение для той доли тепловой мощности, которая дублируется в системе гидроэлектрической мощностью и определяется по формуле

$$\zeta = \frac{K_c (Z - 1)}{K_{TY}}.$$

Гидроэлектрический коэффициент системы по мощности, представляющий мощность гэс в долях всей суммы генерирующих мощностей системы,

$$X_{\Gamma-\Delta}^N = \frac{K_{TY}}{K_c Z}.$$

В формулах:

$K_{\Gamma Y}$  — установленная мощность гэс;  $K_{TY}$  — установленная мощность тэс;  $g = \frac{K_{TY}}{\bar{K}}$  — относительный показатель установленной мощности тэс;  $\bar{K}$  — средняя многолетняя мощность потока;  $X_{\Gamma}^N = \frac{K_{\Gamma Y}}{K_c}$  — гидроэлектрический коэффициент системы по мощности, представляющий мощность гэс в долях годового максимума нагрузки.

Указанные показатели связаны между собой зависимостью:

$$\zeta = \frac{Z - 1}{Z(1 - X_{\Gamma-\Delta}^N)}.$$

(Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. № 6, стр. 883, 1952, Н. А. Карапулов.)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛА НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Разобран вопрос об устойчивости электрических режимов энергосистем, в которых преобладают нагрузки нефтепромыслов, что важно для бесперебойной работы энергетического хозяйства нефтяной промышленности.

Однако предлагаемые на основании экспериментальных исследований рекомендации могут быть использованы во всех энергосистемах, где уровень устойчивости узлов нагрузки недостаточен.

Теоретические и экспериментальные работы позволили рекомендовать в качестве весьма эффективного мероприятия в деле обеспечения устойчивости режимов электрических нагрузок при перерывах электроснабжения и глубоких понижениях напряжения в высоковольтных сетях метод отключения части мощных асинхронных двигателей и последующего автоматического с выдержкой времени повторного их пуска (АПП) без разгрузки приводимых механизмов.

Сотрудники Энергетического института в творческом содружестве с работниками Азэнерго и Азнефти организовали исследования метода АПП, а также разработаны автоматических устройств в реальных условиях работы нефтепромысла.

Опыты позволили сделать некоторые выводы и дать рекомендации для промышленности.

Установлено, что при эксплуатации электрических установок, получающих питание от энергосистем, существующие методы не во всех случаях дают возможность предотвратить длительное расстройство технологического режима нефтепромысла и снижение суточного дебета скважин при разного рода коротких замыканиях в энергосистеме.

Доказаны необходимость и возможность применения в узлах нагрузки автоматических устройств, предназначенных для отключения от сети при глубоких посадках напряжения части асинхронных агрегатов с последующим автоматическим, поочередным с выдержкой времени (в пределах 10...35 сек) повторным пуском их под нагрузкой приводимых механизмов.

Проверена возможность пуска под нагрузкой асинхронных двигателей мощностью до 200 квт при коэффициенте загрузки приводимых ими компрессоров в пределах 0,65...0,9.

Рекомендуются к внедрению в промышленность (применительно к условиям нефтепромыслов) для повышения уровня устойчивости узлов нагрузок энергосистемы следующие мероприятия:

### Первый этап работ:

а) Электродвигатели компрессорных станций, получающие питание от распределительного устройства 2 и 6 кв, по принципу защиты их от пусковых токов разбиваются на четыре группы: первая — двигатели, оборудованные защитой от пусковых токов с выдержкой времени в 3 сек, вторая — с выдержкой в 6 сек, третья — с выдержкой в 10 сек и четвертая группа — с выдержкой в 10 сек и ниже.

б) Двигатели четвертой группы снабжаются также защитой минимального напряжения, срабатывающей с выдержкой времени в 0,5 сек при напряжении 0,6  $U_{ном}$  и ниже. При отсутствии реле минимального напряжения с выдержкой 0,5 сек для части двигателей могут быть приняты выдержки времени в 0 сек.

в) Двигатели четвертой группы оборудуются автоматическими устройствами типа АПВГ-3 и реле времени типа ЭВ-218, применяемыми для автоматического повторного пуска под нагрузкой агрегата с выдержкой времени в пределах 17 сек после восстановления напряжения до уровня 0,7...0,8  $U_{ном}$ .

г) Число двигателей, составляющих четвертую группу, определяется в зависимости от уровня напряжения на зажимах двигателей данной секции распределительного устройства следующим образом: при  $U = U_{ном}$  — три двигателя, при  $U = 0,95 U_{ном}$  — четыре двигателя и при  $U = 0,9 U_{ном}$  — пять двигателей.

д) Двигатели с фазным ротором выделяются в первую и частично во вторую группы.

е) На реле времени ЭВ-218, устанавливаемых на двигателях четвертой группы, принимаются следующие выдержки времени после восстановления напряжения до уровня 0,7...0,8  $U_{ном}$ .

Выдержка времени, сек	При числе двигателей в четвертой группе		
	3	4	5
7	1	2	2
12	1	1	2
17	1	1	1

### Второй этап работ:

а) Электродвигатели с короткозамкнутыми роторами из первой группы также оборудуются автоматическими устройствами по повторному пуску агрегата после отключения их от сети из-за неуспешного самозапуска.

б) Выдержки времени реле после отключения агрегата и восстановления напряжения до уровня 0,7...0,8 на двигателях первой группы принимаются в пределах 24...44 сек.

Статья содержит многочисленные опытные данные и осциллограммы.

(Энергетический бюллетень Министерства нефтяной промышленности, № 8, стр. 6, 1952. Г. Т. Адонц, С. А. Александров, А. Н. Пепов, М. А. Бабаев.)

### ЗА РУБЕЖОМ

#### ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В Англии проявляется значительный интерес к передачам постоянного тока высокого напряжения. В журнале помещено краткое изложение обзорного доклада английской исследовательской организации — The Electrical Research Association (ERA) на эту тему.

Авторы доклада считают, что для дальних передач переменного тока длиной свыше примерно 250 миль (402 км) требуются промежуточные подстанции при передаче нагрузки порядка натуральной или требуется применение других искусственных мер увеличения устойчивости параллельной работы, что удорожает передачу. В электропередачах постоянным током — при заданном уровне изоляции и сечении проводов — можно использовать линию как при большем номинальном напряжении, так и при большем токе сравнительно с передачами переменным током; передаваемая мощность на цепь не лимитируется устойчивостью, поскольку нет синхронной работы и в этом смысле по устойчивости не возникает ограничений мощности в связи с увеличением дальности передачи.

Весьма многообещающим авторы доклада считают применение передачи постоянным током там, где не могут осуществляться воздушные линии и должны осуществляться кабельные линии: при пересечениях водных пространств, густо населенных районов и т. д.

В разделе статьи с кратким обзором исторического развития передачи электроэнергии отмечается, в частности, что в Германии не удалось преодолеть трудностей на пути к промышленному применению дуговых вентиляй Маркса, и в настоящее время наиболее практически оправданным является применение ртутных вентиляй — отдельными единицами или с использованием их в групповом последовательном и параллельном соединениях.

Проводившиеся работы по передачам постоянным током в Германии не были доведены до промышленной эксплуатации; также были прекращены работы, начатые, было, в Швейцарии несколько лет назад.

В Швеции для решения проблемы передачи энергии на расстояние 600...900 миль (966...1448 км) была создана и успешно работает опытная установка с линией длиной 30 миль (48 км) мощностью 6 300 квт при 90 кв между Трольхэттен и Мелеруд. Планируется сооружение к 1954 г. передачи постоянным током мощности 20 мгт при напряжении 200 кв с материка на остров Готланд одножильным кабелем с возвратом тока через море. Имеет-

ся предположение перевести на постоянный ток шведские линии трехфазного тока 380 кв, после того как будут разработаны и испытаны надлежащие преобразователи. В США, насколько известно, весьма мало сделано в отношении разработок, связанных с передачей электроэнергии постоянным током.

По характеристике технических преимуществ системы передачи постоянным током приводятся следующие соображения:

**Воздушные линии.** Можно показать, что трехфазная линия, переведенная на постоянный ток с использованием двух проводов, может передать мощность по крайней мере в 1,33 раза больше, чем на трехфазном токе при том же проценте электрических потерь. Соответственно, если двухцепную трехфазную линию перевести на постоянный ток с тремя двухпроводными цепями, то можно передать удвоенную мощность.

**Кабели.** На кабель данной конструкции можно дать напряжение постоянного тока, много большее, чем переменного тока, что зависит от иных внутренних потерь в изоляции, определяющих возможный предел напряжения. Кабель постоянного тока на 400 кв линейного напряжения требует толщины изоляции (бумажной пропитанной) всего около 0,5 дюйма (12,7 мм), что эквивалентно 60-кв с пропиткой или 132-кв масл- или газонаполненному кабелю при передаче переменным током.

В кабеле, работающем на постоянном токе, нет зарядного тока в установившемся режиме; зарядные токи значительно на переменном токе 50 гц. Реактивная мощность составляет для трехфазной линии около:

2 000 квт на цепь на милю (1,6 км) при 132 кв;  
5 000 квт на цепь на милю (1,6 км) при 220 кв;  
15 000 квт на цепь на милю (1,6 км) при 400 кв.

Для длинных кабельных линий необходимы промежуточные компенсационные пункты с расстояния порядка:

40 миль (64 км) для 132 кв;  
25 миль (40 км) для 220 кв;  
15 миль (24 км) для 400 кв.

Отсюда очевидна возможность применения кабелей на передачах переменным током только при коротких длинах.

**Устойчивость.** При постоянном токе можно говорить об устойчивости работы только для концевых устройств передачи; устойчивость, таким образом, не связана с длиной линии.

**Синхронизация.** Этот вопрос не возникает для передачи постоянным током.

**Возврат тока через землю.** Возможность использования земли в качестве обратного провода еще требует дальнейших исследований для различных случаев.

Технические недостатки передачи постоянным током характеризуются следующим.

**Подстанции.** Конечные подстанции с преобразователями и синхронными компенсаторами, вспомогательными устройствами и сооружениями будут стоить (по английским данным) примерно вдвое дороже сравнительно с аналогичными подстанциями переменного тока.

**Реактивная мощность** требуется для обеспечения работы инверторов в количестве 50...80% от активной мощности линии. Размер реактивного потребления не зависит от длины линии.

**Трансформация напряжения.** Отсутствие возможности простой трансформации постоянного напряжения определяет преимущество системы переменного тока для целей распределения энергии; за системой постоянного тока остается только передача больших мощностей блоком на дальние расстояния.

**Выключатели** приемлемой стоимости пока неосуществимы для системы постоянного тока. Авторы доклада считают, что поскольку постоянный ток вряд ли будет в ближайшее время применяться, кроме как для блочной передачи из одного пункта в другой, то проблема выключателя просто решается сеточным управлением вентиляй.

**Надежность.** Этот вопрос расценивается как трудность преодоления порядка, для устранения которой требуются исследования и опыт.

С экономической точки зрения главное преимущество системы постоянного тока над системой переменного тока заключается в возможности удешевления воздушных линий и применения подземных и подводных кабелей. Этому противостоит увеличенная стоимость подстанций. Отсюда

следует, что воздушная передача постоянным током оказывается выгоднее передачи переменным током лишь при определенной достаточно большой дальности передачи. С другой стороны, очевидно, что вне зависимости от успехов в решении проблемы устойчивости на переменном токе останутся в силе экономические преимущества системы постоянного тока для весьма длинных линий и для высоковольтных кабельных линий.

На основании проведенных исследований авторы статьи приходят к выводу, что для рассмотренной воздушной передачи мощностей 240..400 мгвт капитальные затраты на передачу постоянным током меньше, чем при переменном токе при расстояниях соответственно в 300—350 миль (483—563 км); отмечается, что эти длины, повидимому, снизятся с дальнейшим развитием техники устройства преобразовательных подстанций и стандартизацией специального оборудования.

Если принять во внимание шведские расчеты по стоимости подстанций, произведенные Swedish Power Board совместно с фирмой ASEA, то критические длины снижаются до приблизительно 150 миль (240 км); повидимому, по мнению авторов доклада, истинные значения находятся где-то среди этих цифр.

В тех случаях, когда воздушные передачи неосуществимы, кабельные передачи постоянного тока конкурентоспособны с кабельными линиями переменного тока уже при расстояниях, начиная с 25 миль (40 км).

*Задачи исследований и дальнейшего развития.* Основной задачей разработок является вентильное оборудование. В Англии в настоящее время выпускаются вентили (наиболее близкие к требуемым) на 50 а и 17 кв, а требуются минимально на 500..650 а и 60..80 кв. Принципы устройства подобных вентилей представляются достаточно известными, но разработки потребуют значительного времени и средств, в частности для проверки надежности и износа. Остальное специальное оборудование и аппаратура расцениваются в основном как некоторое развитие известных установившихся отраслей техники (за исключением выключателей постоянного тока).

Исследования по передачам постоянного тока проводились математически и проверялись на лабораторной модели ERA 10 квт, 1 кв. Дальнейшей основной задачей является создание установки такой мощности, чтобы экономически она превосходила аналогичную установку переменного тока и была не менее надежной. Возможно создание промежуточных по масштабам установок, с использованием случаев, когда применение постоянного тока оправдывается техническими причинами (перекрытие водных пространств и т. п.). На ближайшее время (несколько лет) рекомендуется создание опытной установки масштаба 20 мгвт, 200 кв по какой-либо существующей воздушной линии для разносторонних исследований на ней в условиях эксплуатации: преобразовательных устройств, процесса коммутации, влияний паразитных емкостей трансформаторов, демпфирования колебаний в системе и трансформаторах, схем соединения выпрямителей для уменьшения обратных зажиганий, влияний на связь и т. д.

В статье приводится список возможных объектов в Англии и колониях для применения передачи постоянного тока с характеристикой намечаемых основных технических параметров каждой передачи и ее стоимостью. В том числе, например, передачи из угольного района в Лондон (Мидленд — Лондон) мощности в 750 мгвт на расстояние 241 км в кабельном исполнении. Передача, по мнению авторов, может оправдываться экономически в связи со вздорожанием стоимости перевозок топлива и целесообразна в кабельном исполнении ввиду практической невозможности обеспечения трассы для воздушных линий в сильно заселенной местности.

В статье отмечается весьма большой интерес, проявляемый к передачам постоянного тока в СССР, где разработки по этой новой технике были включены в пятилетний план 1946—1950 гг.

Некоторые положения и данные реферируемого доклада не являются бесспорными в свете советских работ, значительно опередивших заграничную технику в этой области.

(BEAMA Journal, май 1952)  
Инж. Н. М. МЕЛЬГУНОВ

## ТРАНСФОРМАТОР ТОКА, ПОДМАГНИЧЕННЫЙ ТОКОМ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

С целью повышения класса точности измерительных трансформаторов тока разработана система с подмагничиванием током тройной частоты. Экспериментально установлено, что при подмагничивании трансформатора током тройной частоты зависимость  $I_2$  от  $I_1$  получается более прямолинейной и сталь намагничивается со значительно меньшим потреблением тока основной частоты, вследствие чего снижается погрешность измерений. На рис. 1 показаны характеристики трансформатора тока без подмагничивания (кривая  $a$ ) и с подмагничиванием током тройной частоты (кривая  $b$ ).

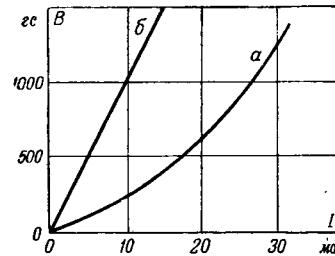


Рис. 1. Характеристики трансформатора тока.

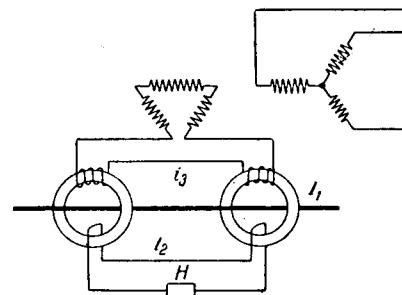


Рис. 2. Схема постороннего подмагничивания тройной частотой ( $H$  — нагрузка).

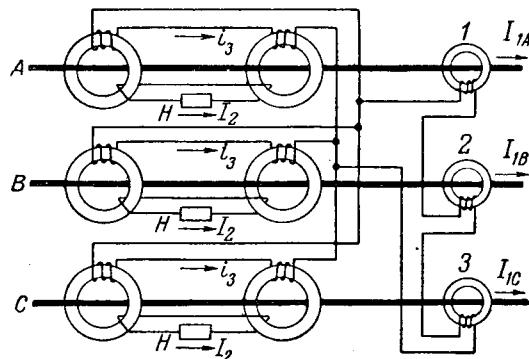


Рис. 3. Схема самоподмагничивания током тройной частоты ( $H$  — нагрузка).

Подмагничивающие ампервитки тройной частоты  $I_3w_3$  рекомендуется выбирать таким образом, чтобы индукция  $B_3$  составляла  $\frac{1}{3} B$ , где  $B_3$  — индукция, обусловленная подмагничиванием током тройной частоты;  $B$  — индукция, обусловленная подмагничиванием током основной частоты.

На рис. 2 приведена схема постороннего подмагничивания током тройной частоты, который может быть получен во вторичной обмотке трехфазного трансформатора, включенного по схеме звезда-разомкнутый треугольник.

На рис. 3 представлена схема самоподмагничивания током тройной частоты для трехфазной цепи. В отличие от схемы рис. 2 она не требует специальной регулировки подводимой мощности третьих гармоник. Ток тройной частоты получается во вторичных обмотках вспомогательных сердечников 1, 2, 3, вторичные обмотки которых также соединены в разомкнутый треугольник.

(Bulletin ASEA, № 8, 1952, I. Goldstein)  
Инж. В. Н. ИСТРАТОВ

## Учреждение Академии наук в Чехословакии

17 ноября 1952 г. в Праге состоялось торжественное открытие Академии наук Чехословакии. В составе Академии создано восемь секций и 40 научно-исследовательских институтов, лабораторий, библиотек.

На заседании, посвященном этому событию, присутствовали члены чехословацкого правительства во главе с премьер-министром А. Запотоцким, руководитель советской делегации акад. В. Виноградов и др.

Вступительное слово произнес президент чехословацкой Академии наук Зденек Неедлы. Премьер-министр А. Запотоцкий в своей речи призвал ученых Чехословакии следовать в своей деятельности примеру ученых Советского Союза.

Участники торжественного заседания послали приветственные письма Генералиссимусу И. В. Сталину и президенту Чехословацкой Республики К. Готвальду.

## Открытие Академии наук Корейской Народно-Демократической Республики

1 декабря 1952 г. в Пхеньяне состоялось торжественное открытие Академии наук Корейской Народно-Демократической Республики.

Вступительное слово произнес министр просвещения КНДР Пэк Нам Ун. Секретарь ЦК Трудовой партии Кореи

Пак Ден Ай в своем выступлении огласила приветствие председателя Кабинета министров КНДР Ким Ир Сена.

Президент Академии наук КНДР Хон Мен Хи в своем докладе отметил огромную помощь Советского Союза корейскому народу в области науки.

## Рассыпухинская межколхозная гэс

Закончилось строительство крупнейшей межколхозной гидроэлектростанции в Сасовском районе Рязанской области на реке Мокше мощностью 2 000 квт. Рассыпухинская гэс воздвигнута по инициативе 60 укрупненных сельскохозяйственных артелей, расположенных в нескольких районах области. Артели получили на строительство гэс государственный долгосрочный кредит в сумме 17 000 000 руб. Строительству была оказана большая помощь предприятиями многих городов, поставивших современную строительную технику, новейшие электрические машины, трансформаторы, аппаратуру и приборы для электростанции и

разнообразное оборудование для электрификации сельскохозяйственного производства в колхозах, которые получат дешевую электроэнергию от новой гэс.

Для передачи энергии Рассыпухинской межколхозной гидроэлектростанции в колхозы и в усадьбы колхозников проведено 400 км высоковольтных и низковольтных сетей. Длина плотины на Мокше достигает 120 м.

Объединение усилий рабочих и колхозников, участвовавших в сооружении новой межколхозной гэс, является еще одним примером тесной дружбы рабочего класса и крестьянства в СССР.

## Золотая медаль имени С. И. Вавилова и премия имени Л. И. Мандельштама

В 1953 г. Академией наук Союза ССР будут проведены конкурсы: на соискание золотой медали имени С. И. Вавилова за выдающиеся работы в области физики и на соискание премии имени Л. И. Мандельштама в размере 20 000 рублей за лучшую работу в области радио.

Об условиях конкурсов и о порядке соискания медали и премии справки выдаются в Отделении физико-математических наук Академии наук СССР (Москва — 56, Большая Грузинская ул., д. № 10).

## Профессор А. М. Залесский

(К 60-летию со дня рождения)

Александр Михайлович Залесский родился 27 ноября 1892 г. В 1920 году он окончил Петроградский политехнический институт (ныне Ленинградский Политехнический институт им. Калинина) и был оставлен преподавателем этого Института. С этого года начинается плодотворная педагогическая и научно-инженерная деятельность А. М. Залесского.

С 1930 по 1936 гг. он руководит кафедрой Техники высоких напряжений и одновременно с этим, с 1933 по 1935 г., занимает должности декана энергетического факультета и заместителя директора по учебно-научной работе института. С 1945 г. А. М. Залесский руководит кафедрой электрических аппаратов.

В 1931 г. А. М. Залесскому присваивается звание профессора, а в 1937 г. он утверждается в ученой степени доктора технических наук.

Педагогическая деятельность А. М. Залесского неразрывно связана с его научно-инженерной деятельностью. С 1922 г. по 1927 г. он работает на Волховском строительстве, занимая должности старшего инженера и начальника технического отдела электротехнической части. С 1927 по 1933 г. работает научным сотрудником Электро-физического института Академии наук СССР, в этот же период принимает участие в разработке проекта грозозащиты Донэнерго. В 1943—1944 гг. он работает в Энергетическом институте Академии наук Узбекской ССР.

В дни Великой Отечественной войны А. М. Залесский провел ценные научные работы по изучению месторождений сырья для изоляторной промышленности и по исследованию перенапряжений в генераторах, за что был награжден Президиумом Верховного Совета Узбекской ССР почетной грамотой.

В настоящее время А. М. Залесский руководит научно-исследовательскими работами, связанными с разработкой высоковольтной аппаратуры для Великих строек коммунизма.

А. М. Залесскому принадлежат более 70 печатных работ по вопросам изоляции, высоковольтных измерений, пе-



ренапряжений, передачи электрической энергии и электрической аппаратуры. Такие его работы как метод расчета распределения напряжения по гирлянде изоляторов, теория короны переменного тока, расчет параметров дуги отключения, метод электрического расчета линий электропередачи и др. являются оригинальными и представляют большую научную ценность. Книги, написанные А. М. Залесским (пособие к лабораторным работам по курсу техники высоких напряжений и сборник упражнений по этому же курсу, масляные выключатели, передача электрической энергии, электрическая дуга и др.) являются ценных учебными пособиями.

А. М. Залесский принимал активное участие в VIII и IX Всероссийских электротехнических съездах и пленумах Всесоюзной электротехнической ассоциации. С 1945 г. он возглавляет секцию высоковольтной тех-

ники ВНИТОЭ, а в 1945 г. избирается председателем Правления Всесоюзного научно-инженерного общества энергетиков.

Под руководством А. М. Залесского в 1947 и 1950 г. проводились Всесоюзные совещания по высоковольтному аппаратостроению. В настоящее время А. М. Залесский ведет большую общественную работу по линии ВНИТОЭ, связанную с научно-технической помощью Великим строекам коммунизма.

А. М. Залесский тесно связан с промышленными предприятиями и научно-исследовательскими институтами, которым в порядке содружества оказывает большую помощь

**М. А. Шателен, Л. Р. Нейман, М. П. Костевко, И. А. Зайцев, Е. Г. Шрамков, М. Д. Каменский, Б. И. Доманский, В. А. Беляков, В. Т. Ренне, В. П. Андреев, Л. М. Пиотровский, Б. Н. Михалев, Г. А. Кукеков, Ю. А. Сабинин.**



## Профессор М. М. Михайлов

К 60-летию со дня рождения и 30-летию научно-педагогической деятельности

Михаил Михайлович Михайлов родился 21 августа 1892 г. в Тбилиси. В 1910 г. он окончил с золотой медалью гимназию. Высшее образование М. М. Михайлов получил на электромеханическом факультете Ленинградского политехнического института. Окончив его в 1922 г., он приступил в ЛПИ к педагогической работе. В 1930 г. М. М. Михайлов был утвержден в ученом звании доцента кафедры технологии электроизоляции материалов.

Наряду с педагогической работой М. М. Михайлов ведет научно-исследовательскую работу в области электроматериаловедения. С 1922 по 1926 г. он работал в Государственном керамическом институте, исследуя физические свойства силикатов, применяемых для электрической и тепловой изоляции. Позже М. М. Михайлов продолжал свои исследования в Государственной физико-технической лаборатории, а затем — в Ленинградском электрофизическом институте. М. М. Михайлов опубликовал ряд работ по разработке и уточнению методики измерения электрических свойств диэлектриков и о природе гигроскопичности и об эффективности пропитки как средства защиты изоляции от действия влажности.

Работы М. М. Михайлова по изучению свойств природных диэлектриков из отечественных месторождений и изоляционных продуктов отечественного производства явились ценным вкладом в дело освобождения нашей страны от импорта электроизоляционных материалов.

М. М. Михайлов принимал активное участие в излании Справочника для электротехников (СЭТ), написав для него ряд разделов по электрическим измерениям, электроизоляционному и электротермии. В 1933 г. он выпустил две книги: «Сетевые и кабельные измерения» и «Электротехнические материалы».



В 1936 г. он издал совместно с коллективом авторов капитальный труд «Испытания электроизолирующих материалов», а в 1940 г. — учебник по электроизоляционному материаловедению.

В 1934 г. М. М. Михайлов получил звание профессора, а в 1936 г. ему была присвоена ученая степень доктора технических наук без защиты диссертации.

М. М. Михайлов явился одним из инициаторов подготовки инженерных и научных кадров для советской электроизоляционной техники и промышленности. В 1935 г. им была организована в ЛПИ специальность «Электроизоляционная и кабельная техника», послужившая во многом образцом для создания аналогичных специальностей и в других вузах.

М. М. Михайлов уделяет много времени содружеству руководимой им кафедры ЛПИ с производством и общественной работой. В настоящее время он является депутатом Ленинградского Областного Совета Депутатов трудящихся, а также активно участвует в работах Комиссии по диэлектрикам при АН СССР.

М. М. Михайлов награжден орденом «Трудового Красного Знамени», медалями «За оборону Ленинграда» и «За доблестный труд в Великой Отечественной войне». В 1951 г. за долголетнюю безупречную педагогическую работу проф. Михайлов был награжден орденом Ленина.

М. А. Шателен, И. А. Зайцев, Л. Р. Нейман, А. М. Залесский, В. Т. Ренне, П. П. Кобеко, Г. П. Михайлов



## Академик А. А. Андронов

31 октября 1952 г. скончался выдающийся ученый, глава школы советских физиков и инженеров, работающих в области теории колебаний и теории автоматического регулирования, академик Александр Александрович Андронов.

А. А. Андронов родился 11 апреля 1901 г. По окончании Московского университета он был оставлен в аспирантуре МГУ. Опубликованные А. А. Андроновым вскоре после окончания аспирантуры работы в области теории колебаний выдвинули его в число наиболее выдающихся ученых мира, работающих в этой области. Введенные в работе А. А. Андронова понятия об автоколебательных (самовозбуждающихся) системах и разработанные им методы изучения нелинейных колебаний создали эпоху в развитии этой науки.

В 1931 г. А. А. Андронов переехал в г. Горький, где до конца жизни работал в Университете. В 1946 г. Александр Александрович Андронов был избран действительным членом Академии наук СССР.

Академик Андронов открыл ряд новых физических явлений, свойственных колебательным системам, и создал

стройное здание новой технической дисциплины — теории нелинейных колебаний.

Успешно занимаясь в течение многих лет приложением разработанной им теории к различным практическим задачам, связанным с электротехникой, радиотехникой, аэро- и гидродинамикой и с вопросами физики, смежными с теорией колебаний, А. А. Андронов внес ценный вклад в развитие народного хозяйства СССР.

Последние годы Александр Александрович работал в области теории автоматического регулирования и создал школу советских ученых, разрабатывающих эту область науки и техники.

В 1947 г. акад. Андронов был избран депутатом Верховного Совета РСФСР и членом Президиума Верховного Совета РСФСР. В 1950 г. он был избран депутатом Верховного Совета СССР.

В лице академика А. А. Андронова советская наука потеряла крупнейшего ученого, активного общественного и государственного деятеля, отдавшего все свои силы и знания служению нашей Родине.



# Библиография

**В. А. ПРИВЕЗЕНЦЕВ. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА С ЭМАЛЕВОЙ И ВОЛОКНИСТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ.** Издание второе, переработанное и дополненное. 432 стр., ц. 9 руб. 75 коп. Госэнергоиздат, 1952.

Производство обмоточных проводов с эмалевой и волокнистой изоляцией является одной из основных отраслей кабельной промышленности. В настоящее время это производство усиленно развивается и в связи с этим вопросы, связанные с подготовкой квалифицированных кадров эмалировочных и обмоточных цехов кабельных заводов, являются весьма актуальными. Поэтому выпуск Госэнергоиздатом рецензируемой книги следует признать весьма своевременным.

Книга состоит из двух примерно равных по объему частей, из которых первая посвящена эмалированным проводам и вторая — обмоточным проводам с волокнистой изоляцией.

Первая часть книги разбита на пять отдельных глав. Глава I посвящена эмальлакам; в начале этой главы приведены основные сведения о пленкообразующих веществах и процессах пленкообразования, а также о растворителях и сиккативах; далее даны сведения о всех основных рецептурах эмальлаков. В главе II рассмотрено эмалирование проводов; наряду с теоретическими вопросами (природа поверхностного натяжения, адгезия эмалевых покрытий и т. п.) дан подробный анализ технологического процесса эмалирования (способы эмалирования, количество покрытий, скорость эмалирования, расход эмальлаков и т. д.). В главе III дана подробная характеристика технологического оборудования лаковарочных отделений и эмальлаков. В главе IV изложены новые методы испытаний и исследований механических, физико-химических и электрических свойств эмалированных проводов, которые в основном разработаны в НИИ кабельной промышленности под руководством автора книги. В главе V описываются свойства эмалированных проводов различных типов.

Вторая часть состоит из четырех глав. В главе VI дана теория обмотки и оплетки; в этой же главе помещен раздел, касающийся выбора основных параметров обмотки. Глава VII содержит подробные сведения о новых волокнистых и пленочных материалах для изоляции проводов. Глава VIII посвящена оборудованию обмоточных цехов; помимо обычных обмоточных машин, здесь подробно описаны дельта-асбестовые и стеклообмоточные машины, а также оборудование для наложения пленочной изоляции. Наконец, в главе IX дана характеристика обмоточных проводов с волокнистой изоляцией различных конструкций.

Таково содержание рецензируемой книги. Переходя к ее оценке, следует прежде всего отметить, что в книге изложен материал в полном соответствии с современным состоянием данного производства и последними достижениями кабельной техники в этой области. Отличительной особенностью книги является оригинальность изложенного материала, в особенности в части теории и технологии эмалирования и обмотки. Для работников кабельной промышленности, а также для инженерно-технического персонала электромашиностроительных и аппаратных заводов большой интерес представляют главы V и IX, в которых приведены результаты всесторонних исследований обмоточных проводов с эмалевой и волокнистой изоляцией различных типов. В книге достаточно полно отражена ведущая роль советских ученых и инженеров в разработке новых конструкций обмоточных проводов и технологии их производства.

Своему основному назначению — быть учебным пособием для учащихся техникумов книга, безусловно, удовлетворяет. Следует только отметить, что теоретические главы книги, которые в целом изложены в общем ясно и доступно, для студентов техникумов все же слишком

сложны и смогут ими прорабатываться только частично. Книга с успехом может быть использована студентами вузов и слушателями факультета усовершенствования инженеров ВЭЭИ, для которых рецензируемая книга пока что является единственным учебным пособием по специальности «Обмоточные провода».

В книге отсутствует глава о проводниковых материалах и таких волокнистых материалах, как пряжа и натуральный шелк, которые пока что являются основными изоляционными материалами в производстве обмоточных проводов с волокнистой изоляцией. Автор указывает в предисловии, что он ограничился рассмотрением только новейших электроизоляционных материалов только потому, что учащиеся проходят курс «Электротехнические материалы». Однако сведения, даваемые в этом курсе, совершенно недостаточны для работников кабельной промышленности. Так, следовало указать, какая пряжа должна применяться — гребеная или кардного чесания и на каких машинах эта пряжа должна изготавляться, и т. д. В начале главы VI есть очень краткие указания по этим вопросам, сделанные автором вскользь в соответствии с чисто теоретическим характером этой главы; между тем у автора имелись возможности осветить все эти вопросы более обстоятельно. Также необходимо было бы дать описание основных свойств натурального шелка, его современной маркировки и мероприятий по максимальной экономии этого дорогостоящего материала; автор этого не сделал, а ограничился лишь подробной характеристикой одного из рекомендуемых им заменителей шелка — капронового волокна.

Нам кажется излишним описание (стр. 374—376) старых конструкций дельта-асбестовых машин, которые в ближайшее время будут заменены более совершенными конструкциями, также описанными в рецензируемой книге. То же самое следует сказать относительно слишком детального описания глифталевого эмальлака, тем более, что сам автор указывает на некоторые отрицательные стороны этого лака; мы считаем, что в недалеком будущем провода марки ПЭТ будут выпускаться на этом лаке винилфлекс или металвин.

В разделе об обмоточных проводах с пленочной изоляцией автор неполно осветил недостатки этой изоляции, мешающие пока что широкому внедрению ее в производство. НИКФИ занимаются пленочной изоляцией уже несколько лет.

Автор подробно рассмотрел новые методы испытания эмалированных проводов, но уделил очень мало внимания усовершенствованию методики испытания проводов с волокнистой изоляцией.

Помимо приведенных выше, можно было бы сделать еще ряд замечаний; однако, они все же не изменяют общего вполне положительной оценки книги. Такое заключение подтверждается также и проявленным интересом к книге, которая была распродана очень быстро.

Оформление книги удовлетворительно, за исключением переплета, который ни по виду, ни по качеству не соответствует солидному содержанию книги.

При переиздании книги, которое следует признать безусловно, желательным, следует надеяться, что автор учтет сделанные замечания и внесет соответствующие корректировки в книгу. Кроме того, при переиздании книги автор должен учесть, что в 1953—1954 гг. войдут в силу новые ГОСТ на обмоточные провода и на эмалированные высокопрочные провода.

**Главный инженер завода МЭЛ  
К. В. СИДОРов**

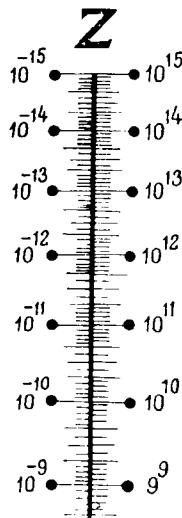
НОМОГРАММА ДЛЯ ВОЗДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА В СТЕПЕНЬ БОЛЬШЕ ЕДИНИЦЫ

$\pm y$

Формула  
 $Z = X^y$

Примеры

- 1) Дано:  $y = 10$ ;  
 $x = 5$ .  
Найдем  $z = 9,8 \cdot 10^6$
- 2) Дано:  $y = 10$ ;  
 $x = 0,2$ .  
Найдем  $z = 1,02 \cdot 10^{-7}$



Примечание

Если число  $y$  положительно (+),  
то левой стороне шкалы  $X$  соот-  
ветствует левая сторона шкалы  $Z$ ,  
правой стороне  $X$  — правая сторона  
шкалы  $Z$ .

Если же число  $y$  отрица-  
тельно (-), то наоборот: ле-  
вой стороне шкалы  $X$  соот-  
ветствует правая сторона  
шкалы  $Z$ , правой стороне  $X$  —  
левая сторона шкалы  $Z$ .

- 3) Дано:  $y = -8$ ;  
 $x = 2$ .  
Найдем  $z = 4 \cdot 10^{-3}$

- 4) Дано:  $y = -8$ ;  
 $x = 0,5$ .  
Найдем  $z = 2,55 \cdot 10^2$

