

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА  
СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

МОСКВА

7  
1980  
ИЮЛЬ

ЭНЕРГИЯ

Ровно 100 лет назад, в июле 1880 г., вышел первый номер журнала «Электричество», старейшего русского и одного из старейших в мире электротехнических журналов. Журнал «Электричество» был основан выдающимися русскими электротехниками Д. А. Лачиновым, А. Н. Лодыгиным, А. Г. Столетовым, В. Н. Чиколовым, П. Н. Яблочковым и др.

В дореволюционный период журнал знакомил инженерную и научную общественность с отечественными и зарубежными достижениями новой для того времени науки — электротехники, вел работу по пропаганде широкого использования этих достижений на практике, по защите приоритета русских ученых. К концу этого периода вокруг журнала сформировалась большая группа ученых и инженеров, привлеченных после Великой Октябрьской социалистической революции к составлению плана ГОЭЛРО, активным пропагандистом и проводником которого был журнал «Электричество». В работе журнала участвовали выдающиеся ученые и государственные деятели того времени Г. М. Кржижановский, А. В. Винтер, Г. О. Графтио, Р. Э. Классон, Л. Б. Красин, К. А. Круг, А. А. Смурров, Б. И. Угриков, М. А. Шателен и др.

В годы первых пятилетних планов развития народного хозяйства страны журнал «Электричество» внес существенный вклад в разработку и пропаганду научных и практических вопросов электрификации страны в соответствии с планом ГОЭЛРО, развитие электроэнергетики и электротехнической промышленности, распространение передового опыта.

В предвоенные годы были опубликованы статьи о перспективах развития электроэнергетики страны — создании Единой энергетической системы (ЕЭС) СССР, дальних электропередачах большой мощности, автоматизации промышленности и др. В послевоенный период эта тематика наряду с вопросами восстановления электропромышленности и энергохозяйства стала основополагающей в деятельности журнала.

Журнал «Электричество» оказал определяющее влияние на формирование русской и советской электротехнической школы. Он активно проводит политику Коммунистической партии и правительства в области электрификации страны и является пропагандистом марксистско-ленинского мировоззрения в решении научных и практических проблем электротехники.

Более подробно о деятельности журнала в советский период рассказывается в статьях этого юбилейного номера.

В настоящее время основу тематики журнала составляют новые, перспективные направления развития электроэнергетики и электротехники, определенные решениями XXIV и XXV съездов КПСС и пленумов ЦК КПСС.

За заслуги в развитии отечественной электротехники и энергетики, пропаганде научно-технических достижений, передового производственного опыта и в связи со 100-летием со дня основания Президиума Верховного Совета СССР наградил журнал «Электричество» орденом «Знак Почета».

Высокая правительственные награда обязывает редакцию и редколлегию журнала «Электричество» и впредь быть активным пропагандистом и проводником в жизнь ленинских идей электрификации в современных условиях развитого социализма и научно-технической революции, способствовать прогрессу в разработке теоретических и практических задач электротехники и энергетики.

*Из протоколов заседания  
VI (электротехнического) отдела  
Русского технического общества*

(см. «Электричество», 1880, № 1)

30-го января 1880 года было первое собрание тех членов Общества, которые подписали заявление о желании открыть новый отдел Общества по электрической технике.

В этом собрании были избраны: председателем отдела — ФИЛАДЕЛЬФ КИРИЛЛОВИЧ ВЕЛИЧКО.

Кандидатом его — ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ ЯБЛОЧКОВ.

Непременными членами: Н. М. АЛЕКСЕЕВ, В. А. ВОСКРЕСЕНСКИЙ, И. Н. ДЕРЕВЯНКИН, М. А. КОТИКОВ, Д. А. ЛАЧИНОВ, МИЛЛЕР, В. И. СВЯТСКИЙ, А. И. ШПАКОВСКИЙ и В. Н. ЧИКОЛЕВ.

В собрании VI отдела 6 февраля между прочим В. Н. Чиколев прочел предложение об издании отделом журнала по электротехнике.

В виду возникших дебатов решение вопроса о журнале и всех о нем правил положено отложить до одного из будущих заседаний.

Собрание членов VI отдела Императорского Русского Технического Общества 7-го мая 1880 г. состоялось под председательством Ф. К. Величко. Присутствовали: канд. предс. П. Н. Яблочков, непременные члены: Алексеев, Котиков, Лачинов, Воскресенский, Деревянкин, Святский, Чиколев и 14 членов отдела.

Председатель прочел правила об издании VI отделом отдельной части записок общества в виде особого журнала под названием «Электричество». Так как правила, составленные отделом, были в некоторых частях изменены Советом Общества, то председатель предложил на решение отдела вопрос: приступить ли к изданию журнала на основании этих измененных правил или нет?

После продолжительных прений собрание единогласно решило приступить к изданию журнала «Электричество» с июля сего года выпусками от 2 до 4 печатных листов с назначением подписной цены: 6 руб. за год или 3 руб. за полгода посторонних лиц и 5 руб. за год или 2,5 руб. за полгода для членов общества.

Председатель отдела в силу права, предоставленного ему новыми правилами о журнале, объявил собранию, что он избирает редакторами журнала: по телеграфии В. А. Воскресенского, по прочим отделам электротехники пока одного В. Н. Чиколева, возлагая на него и обязанности редактора-исполнителя по общим делам редакции и хозяйственной ее части.

При этом председатель добавил, что он рассчитывает на постоянное содействие в отделах ученом и учебном на Лачинова и по гальванопластике на Окшевского. Так как средства нового журнала весьма невелики, то председатель добавил от имени Воскресенского и Чиколева, что первое полугодие они отказываются от всякого вознаграждения за труды по редактированию журнала.

## Редакции и редколлегии журнала „Электричество”

Президиум Академии наук СССР поздравляет редакцию и редколлегию журнала «Электричество» по случаю 100-летия со дня основания журнала и награждения его орденом «Знак Почета».

Созданный пионерами отечественной электротехники в конце прошлого века журнал «Электричество» сыграл в дальнейшем важную роль в пропаганде достижений отечественной электротехнической науки, защищая приоритета русских и советских ученых, воспитании научных и инженерных кадров.

Более 40 лет журнал является органом Академии наук СССР.

Привлечение к работе в журнале «Электричество» на всех этапах его истории выдающихся русских и советских ученых и инженеров — А. Н. Лодыгина, А. Г. Столетова, В. Н. Чиколева, Г. М. Кржижановского, Л. Б. Красина, Б. И. Угримова, Г. О. Графтио, И. Г. Александрова, Б. Е. Веденеева, А. В. Винтера, К. А. Круга, М. А. Шателена, М. П. Костенко, Л. Р. Неймана и многих других — обеспечило его высокий научно-технический уровень, публикацию статей по наиболее актуальным теоретическим и научно-практическим вопросам.

Журнал пользуется заслуженным высоким авторитетом не только в нашей стране, но и за рубежом.

Желаем журналу «Электричество» и впредь высоко нести знамя советской науки. К этому его обязывают славные традиции и высокая правительственная награда.

Президент Академии наук СССР,  
академик А. П. АЛЕКСАНДРОВ

## Редколлегии журнала „Электричество”

Государственный комитет СССР по науке и технике поздравляет редакцию, авторов и читателей журнала «Электричество» в связи со 100-летием со дня его основания и награждением орденом «Знак Почета».

Журнал «Электричество» оказал огромное влияние на формирование русской и советской электротехнической школы, воспитание многих поколений отечественных электротехников и виднейших ученых.

Особенно велики заслуги журнала в советский период его деятельности, когда он стал одним из организаторов реализации ленинских идей электрификации страны — плана ГОЭЛРО. Журнал является активным пропагандистом политики Коммунистической партии и правительства в области широкой электрификации всех отраслей народного хозяйства Советского Союза, создания Единой энергетической системы СССР, дальнейшего развития электротехнической промышленности.

Государственный комитет СССР по науке и технике выражает уверенность в том, что журнал «Электричество» и впредь будет активным участником и проводником научно-технического прогресса в реализации исторических постановлений XXV съезда КПСС, последующих пленумов ЦК и указаний товарища Л. И. Брежнева, направленных на успешное решение топливно-энергетической проблемы.

Председатель Государственного комитета СССР  
по науке и технике, академик Г. И. МАРЧУК

*Редакции и редколлегии журнала  
„Электричество”*

Всесоюзный Совет научно-технических обществ горячо и сердечно поздравляет творческий коллектив журнала «Электричество» с награждением высокой правительственной наградой — орденом «Знак Почета». Желаем дальнейших творческих успехов в пропаганде достижений науки и техники.

ИШЛИНСКИЙ А. Ю., ГРИЦЕНКО Н. Н.

*Редакции и редколлегии журнала  
„Электричество”*

Президиум Центрального правления Научно-технического общества энергетики и электротехнической промышленности горячо поздравляет редколлегию и редакцию старейшего в нашей стране электротехнического журнала «Электричество» со 100-летием со дня основания и награждением правительственной наградой — орденом «Знак Почета».

Желаем редколлегии и редакции журнала «Электричество» дальнейших успехов в пропаганде новых научных и технических идей, защите приоритета достижений советской электротехнической науки, расширении авторского актива и плодотворной работы на благо развития отечественной энергетики и электротехнической промышленности.

Председатель Центрального правления НТО  
энергетики и электротехнической промышленности,  
член-корр. АН СССР, Герой Социалистического Труда  
Н. Н. КОВАЛЕВ

*Редакции и редколлегии журнала  
„Электричество”*

Коллегия Министерства энергетики и электрификации СССР сердечно приветствует и поздравляет редакционную коллегию и сотрудников ведущего в стране теоретического и научно-практического журнала «Электричество» со 100-летием со дня основания и заслуженной высокой правительственной наградой — орденом «Знак Почета».

Журнал вносит большой вклад в формирование отечественной школы специалистов-электроэнергетиков и электротехников, в успешное решение актуальных научных и практических проблем электроэнергетики, в подготовку и повышение квалификации научных и инженерных кадров, в повышение международного авторитета советской науки и техники.

Почти 60 лет журнал «Электричество» является неустанным пропагандистом и проводником в жизнь ленинских идей электрификации страны, воплощенных в плане ГОЭЛРО и последующих решениях и постановлениях партии и правительства по вопросам развития народного хозяйства страны в целом и электроэнергетики в частности.

Журнал пользуется заслуженным уважением не только в нашей стране, но и за рубежом.

Коллегия желает всем членам редколлегии и сотрудникам журнала «Электричество» крепкого здоровья, личного счастья и дальнейших успехов в их деятельности по развитию советской науки и техники в области электроэнергетики и электротехники.

Министр энергетики и электрификации СССР  
П. С. НЕПОРОЖНИЙ

## Журналу „Электричество”

От имени коллегии Министерства электротехнической промышленности сердечно поздравляю редакцию, редакционную коллегию и авторский коллектив журнала «Электричество» со 100-летием со дня основания этого ведущего электротехнического журнала нашей страны.

В обращении редакции в первом номере 1880 года сообщалось о намерении «популяризовать начала, на которых основываются все применения электричества, распространять сведения об его успехах и заслугах, о наилучших изобретениях в этой области у нас и за границей, следить за литературой по электричеству и комментировать важнейшие сочинения, облегчать, по возможности, труд и справки специалистам и друзьям науки полезными библиографическими и техническими указаниями».

Этим традициям журнал неуклонно следует.

Работники электротехнической промышленности и руководство Министерства используют журнал «Электричество» как трибуну пропаганды передовых идей теории и практики развития различных отраслей электротехники. Ведущие ученые-электротехники, начиная с самого основания журнала, работают в тесном сотрудничестве с ним. Публикации материалов по принципиальным вопросам электротехники способствуют повышению теоретического уровня научных исследований, проводимых в организациях электротехнической промышленности.

Желаем вам дальнейших успехов и настойчивости в благородном деле популяризации новых научных достижений, направленных на решение ответственных задач, поставленных перед электротехнической промышленностью XXV съездом КПСС.

Министр электротехнической промышленности СССР  
А. К. АНТОНОВ

## Редакции и редколлегии журнала „Электричество”

Многотысячный коллектив монтажников, сотрудников научно-исследовательских, проектных и других организаций Министерства монтажных и специальных строительных работ СССР горячо приветствует и сердечно поздравляет редакционную коллегию, коллектив и авторов журнала «Электричество» со знаменательной датой — 100-летием со дня основания и награждением журнала орденом «Знак Почета».

С первых дней советской власти журнал стал активным борцом за выполнение ленинских идей электрификации страны.

Широкое освещение на страницах журнала теоретических вопросов в области электротехники, опыта практического применения инженерных методов расчета для сложных электротехнических установок и систем способствовало воспитанию квалифицированных советских специалистов, ученых и инженеров-электриков, дальнейшему развитию технического прогресса в области электроэнергетики и создало журналу заслуженный авторитет среди его читателей в Советском Союзе и за рубежом.

В день 100-летнего юбилея журнала желаем Вам больших творческих успехов в деле развития отечественной электротехники, способствующей дальнейшему научно-техническому прогрессу и претворению в жизнь исторических решений XXV съезда Коммунистической партии Советского Союза в деле построения материально-технической базы коммунизма.

Министр монтажных и специальных строительных работ СССР Б. В. БАКИН

## Редакционной коллегии журнала „Электричество”

Министерство высшего и среднего специального образования СССР поздравляет редакционную коллегию, всех сотрудников журнала «Электричество» с его 100-летним юбилеем.

В течение всей своей истории, от первых шагов отечественной и мировой электротехники и энергетики до современного этапа их развития шло становление журнала, получившего сейчас мировую известность.

Эпиграфом к изданию журнала служат крылатые слова В. И. Ленина: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны».

Предоставив свои страницы для первых публикаций, освещавших ленинский план ГОЭЛРО, журнал уделяет большое внимание всему новому, что несет с собой развитие науки об электричестве.

В публикуемых журналом статьях находят постоянное отражение теоретические и практические проблемы, которые сформировали электротехнику и электроэнергетику как мощную промышленную отрасль народного хозяйства и как учебную и научную дисциплину.

Журнал «Электричество» пользуется большим авторитетом среди преподавателей и специалистов высшей школы, которые часто выступают на его страницах со статьями, посвященными актуальным проблемам развития электротехники и энергетики.

В составе его редакционной коллегии вместе с наиболее квалифицированными специалистами отрасли трудятся и ученые высшей школы.

Мощное развитие электротехники и энергетики предъявляет все возрастающие требования к подготовке высококвалифицированных инженерно-технических работников и научных кадров. Преподаватели и ученые высших учебных заведений плодотворно сотрудничают с журналом в деле постановки и обсуждения проблем высшего и среднего электротехнического и электроэнергетического образования, направленных на улучшение профессиональной подготовки специалистов, активное привлечение учащихся к новейшим достижениям науки и техники.

Министерство желает редакционной коллегии и сотрудникам журнала «Электричество» дальнейших успехов в объединении усилий всех специалистов и ученых для решения задач коммунистического строительства в деле содействия воплощению великих ленинских идей электрификации.

Министр высшего и среднего специального образования СССР В. ЕЛЮТИН

## Пропагандист и проводник в жизнь ленинских идей электрификации страны

Министр энергетики и электрификации СССР НЕПОРОЖНИЙ П. С.

Последняя четверть XIX столетия была переломной в развитии электротехники: начали появляться первые электрические станции, электрическое освещение завоевывало преобладающие позиции в городах, в промышленности начали внедряться электродвигатели — это было началом электрификации.

Именно в этот период — в 1880 г. — передовыми русскими электротехниками Д. А. Лачиновым, А. Н. Лодыгиным, А. Г. Столетовым, В. Н. Чиколовым, П. Н. Яблочковым был основан журнал

«Электричество», первый в нашей стране и один из первых в мире электротехнических журналов.

С самого начала своего существования журнал уделял большое внимание теоретическим и практическим вопросам генерирования и передачи электроэнергии, сооружения электростанций и линий электропередач. По этим спорным для того времени проблемам организовывались дискуссии, публиковались статьи, освещавшие отечественные и зарубежные исследования, разработки и опыт. В частности, большое значение для определения

направления развития отечественной электроэнергетики в конце XIX—начале XX вв. имели опубликованные в журнале «Электричество» статьи о со-поставлении систем передачи и распределения электроэнергии на постоянном и переменном токе, особенно о преимуществах трехфазных систем переменного тока в связи с изобретениями М. О. Доливо-Добровольского, рассматривавшихся в статьях Р. Э. Классона и самого М. О. Доливо-Добровольского.

В период, предшествовавший Великой Октябрьской социалистической революции, в журнале уделялось много внимания описанию проектов и итогов сооружения районных, муниципальных, заводских, трамвайных и других электростанций, а также линий электропередач и распределительных сетей высокого напряжения. Начали публиковаться статьи по вопросам эксплуатации электрооборудования, теории перенапряжений и защиты от них. Большое значение имела проводившаяся журналом «Электричество» в 1910—1915 гг. дискуссия о системе тока для электрификации железных дорог.

Многолетняя последовательная и систематическая работа журнала сыграла положительную роль в организации специалистов, когда в 1920 г. Г. М. Кржижановскому было поручено составление плана ГОЭЛРО.

После победы Великой Октябрьской социалистической революции журнал «Электричество», долго остававшийся единственным в стране электротехническим журналом, стал неутомимым пропагандистом и проводником в жизнь ленинских идей электрификации страны, воплощенных в утвержденном в декабре 1920 г. плане ГОЭЛРО. Этому плану и его выполнению были посвящены статьи видных ученых, инженеров и государственных деятелей того времени: Г. М. Кржижановского, А. В. Винтера, А. А. Горева, Р. Э. Классона, М. К. Поливанова, А. А. Смуррова, Б. И. Угримова и др.

В годы первых пятилетних планов развития народного хозяйства страны и особенно в предвоенные годы в журнале «Электричество», наряду с материалами о создании конкретных электроэнергетических объектов, публикуется много статей, посвященных общим принципиальным вопросам развития электроэнергетики: генеральному плану дальнейшей электрификации страны, созданию единой высоковольтной сети, передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения, устойчивости энергосистем, автоматике и телемеханике. Эти материалы были использованы не только непосредственно в тот период, но особенно в послевоенное время, когда получили наиболее широкое развитие.

Очень большое значение для решения актуальных задач дальнейшего развития восстановленной после войны электроэнергетики страны имело освещение на страницах журнала «Электричество» ключевых научно-технических проблем создания и устойчивости дальних электропередач переменного тока с напряжением 400—500 кВ от сооружаемых на Волге мощных гидроэлектростанций (Куйбышевской и Волгоградской) до Москвы. В частно-

сти, помимо проблем освоения самого высокого в то время в мире напряжения 500 кВ, особого упоминания заслуживают статьи об опережающих мировой уровень разработках советскими учеными и инженерами систем так называемого сильного регулирования возбуждения синхронных машин, обеспечивающих не только количественный, но и качественный скачок в решении вопросов повышения устойчивости энергосистем. В этот же период журнал уделял большое внимание начатым в СССР, ранее чем в других странах, теоретическим и экспериментальным исследованиям специальных режимов и переходных процессов в энергосистемах. Все эти исследования в последующие годы были развиты, а их результаты получили широкое применение не только для обеспечения устойчивой работы отдельных электропередач, но и объединения энергосистем в целом. Не оставил журнал без внимания и крупное событие 1954 г.—пуск в нашей стране первой в мире атомной электростанции.

В последнее двадцатилетие журнал «Электричество» оказывает большую помощь советским электроэнгетикам и способствует росту их международного авторитета, публикуя много статей, посвященных принципиальным ключевым проблемам создания и управления ЕЭС СССР с широким использованием достижений научно-технической революции в области техники высоких напряжений, совершенствования систем охлаждения мощных генераторов и трансформаторов, полупроводников, вычислительной техники. В частности, можно указать на появление на страницах журнала имеющих большое значение статей о перспективах развития ЕЭС СССР, оптимизации режимов ее работы, разработках и освоении линий электропередач сверхвысокого напряжения переменного (750 и 1150 кВ) и постоянного (1500 кВ и более) тока, о создании и освоении необходимого для этих передач и современных мощных электростанций электрооборудования, повышении надежности и качества электроснабжения потребителей и т. п.

Особое значение имели помещенные в журнале материалы по вопросам устойчивости и живучести формируемой Единой энергосистемы страны.

Отмечая 100-летие со дня основания ведущего в стране электротехнического журнала «Электричество», следует в целом подчеркнуть, что всей своей деятельностью журнал в очень большой степени определял формирование отечественной электротехнической школы, успешное решение актуальных научных и практических проблем электроэнергетики, подготовку и повышение квалификации научных и инженерных кадров этих отраслей.

В настоящее время, в период подготовки к XXVI съезду КПСС, электроэнгетики ждут от журнала дальнейшей большой, еще более активной работы по пропаганде ленинских идей электрификации и развития электроэнергетики страны на современном этапе. Должны быть освещены итоги ее развития в период X пятилетки, задачи на XI пятилетку и на перспективу до 1990 г., в частности: по особенностям развития и работы ЕЭС СССР с учетом широкого строительства АЭС в Европейской части СССР, сооружения мощных

тепловых и гидравлических электростанций на Востоке страны, необходимости сооружения линии и сетей переменного тока на напряжения 1150 кВ, а также электропередач постоянного тока, расширения маневренности действующих электростанций и постройки специальных маневренных установок и т. п. Должно быть сосредоточено внимание на

перспективных, нетрадиционных способах генерирования и транспорта электроэнергии.

Особое внимание должно быть уделено вопросам оптимизации работы Единой энергосистемы и освещения рациональных направлений ее формирования для различных этапов развития электроэнергетики.



## Летопись отечественной электротехники

Заместитель министра электротехнической промышленности **НИКИТИН Ю. А.**

Журнал «Электричество», основанный на заре становления электротехники в России, с первых номеров стал летописью отечественной электротехнической науки. Каждая значительная веха в ее развитии находила немедленный отклик на страницах журнала.

Опубликованные в первых номерах журнала 100 лет тому назад статьи Д. А. Лачинова «Об электромеханической работе» положили начало формированию в нашей стране теории передачи и применения электроэнергии. В последующее десятилетие на страницах журнала получили дальнейшее развитие вопросы теории и практики передачи и применения электроэнергии в промышленности и сельском хозяйстве. В 1896 г. журнал «Электричество» впервые оповестил мир о великом изобретении А. С. Попова — приборе для обнаружения и регистрации электрических колебаний в атмосфере.

В опубликованных в начале века основополагающих работах выдающихся ученых В. Ф. Миткевича, А. Ф. Иоффе, К. А. Круга, К. И. Шенфера, Н. Д. Папалекси был заложен фундамент таких важнейших разделов электротехнической науки и практики, как электронная теория вещества, высоковольтные линии передачи электроэнергии, основы теории, расчета и конструирования электрических машин, статические преобразователи тока, электрометаллургия и др.

Трудно переоценить роль и значение журнала «Электричество» в создании советской электротехнической промышленности. В первые послереволюционные годы журнал выступил как знаменосец передовых идей ленинского плана ГОЭЛРО. В период восстановления народного хозяйства после гражданской войны и в годы первых пятилеток на страницах журнала регулярно выступали такие крупнейшие советские ученые и инженеры, как К. И. Шенфер, М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский, Д. В. Ефремов, Р. А. Лютер, труды которых еще в тридцатые годы способствовали решению таких кардинальных вопросов электромашиностроения, как создание турбогенераторов с водородным охлаждением, разработка новейших конструкций асинхронных двигателей и др.

После Великой Отечественной войны тематика журнала продолжала расширяться, охватив проб-

лемы автоматики и телемеханики, релейной защиты, полупроводниковой техники, надежности электрооборудования, электрификации транспорта, создания новых средств и систем управления электроприводом.

История развития отечественной электротехники, запечатленная на страницах журнала «Электричество», неразрывно связана с преемственностью поколений сотрудничающих в ней крупнейших ученых, инженеров и руководителей промышленности. В последние годы в журнале выступали министр электротехнической промышленности А. К. Антонов, министр энергетики и электрификации П. С. Непорожний, заместитель председателя Госкомитета СССР по науке и технике Г. В. Алексенко и др.

Журнал «Электричество» тесно связан с большим кругом советских специалистов и ученых стран социалистического содружества, работающих в самых различных областях электротехники. Плодотворная деятельность журнала, пропагандирующего передовые достижения теории и практики в области производства и применения электрической энергии, вносит существенный вклад в развитие электротехнической промышленности СССР.

На страницах журнала «Электричество» отражен практически весь путь становления и развития отечественной электротехники. Ныне советская электротехника вышла на передовые рубежи, что также находит отражение в журнале. Созданы уникальные турбо- и гидрогенераторы мощностью соответственно 1200 и 640 МВт, трансформаторы мощностью 1600 МВ·А, мощные высоковольтные автотрансформаторы. На основе полупроводниковых приборов разработано электрооборудование для электропередач постоянного тока напряжением до 1500 кВ.

Электромашиностроительные заводы Советского Союза выпускают для привода прокатных станов самые передовые уникальные электрические машины постоянного тока предельной мощности, отличающиеся высокими динамическими параметрами. Освоение производства мощных полупроводниковых приборов позволило создать серии статических преобразователей для электроприводов постоянного и переменного токов мощностью 25 МВт и выше.

Для различных отраслей промышленности разрабатываются автоматизированные комплексы электрооборудования, которые изготавливаются специализированными предприятиями. Современные системы управления выполняются на основе электронных компонентов повышенной степени интеграции, в том числе с использованием микропрограмм.

цессорных наборов и специализированных интегральных схем гибридного исполнения.

Освещение важнейших работ на страницах журнала «Электричество» позволяет эффективно передавать опыт широкому кругу инженеров-разработчиков, что способствует более успешному выполнению решений XXV съезда КПСС.



## Журнал „Электричество” в период реализации плана ГОЭЛРО и строительства социализма в СССР (1922—1941 гг.)<sup>1</sup>

БЕРТИНОВ А. И., доктор техн. наук, ЕВСЕЕВ Б. Н., инж.

В октябре 1922 г. возобновилось издание журнала «Электричество», прерванное, «когда события, сопровождавшие грандиозный переворот в России, — говорится в редакционной статье, — временно приостановили выпуск в свет его номеров. Но редакционная группа существовала до самого последнего времени, собирала материалы для журнала и готовилась приступить к печатанию журнала при первой возможности».

Так начался новый, советский период деятельности старейшего русского журнала в условиях народной власти, определившей коренные изменения в политической, экономической, социальной и культурной жизни России. Изменилось и назначение журнала — он должен был служить интересам великого социалистического переустройства страны, задачам плановой электрификации всего народного хозяйства.

Почти 50 лет спустя, газета «Правда» напишет в статье, посвященной журналу «Электричество»: «Это — трибуна, где идет непримиримый вечный бой нарождающегося нового с отживающим старым». Это определение, пожалуй, наиболее точно характеризует именно описываемый здесь период деятельности журнала «Электричество», когда он стал проводником идей ленинского плана ГОЭЛРО, когда все его содержание было нацелено на превращение в жизнь планов первых пятилеток.

Журнал стал органом Главного управления электротехнической промышленности ВСНХ (Главэлектро), VI (электротехнического) отдела РТО, Всероссийских электротехнических съездов, Центрального электротехнического совета (ЦЭС), Общества электротехников в Москве, Русского электротехнического комитета МЭК. Во главе журнала стоял редакционный совет, состоящий из представителей вышеперечисленных организаций, исполнительные функции выполнял редакционный комитет из трех человек, назначаемых издателями; долгое время ими были начальник Главэлектро А. З. Гольцман, проф. М. А. Шателен и проф. Е. Я. Шульгин. В 1925 г. была введена должность ответственного редактора. Им стал профессиональный революционер П. И. Воеводин, которому партия поручила пропаганду электрификации.

Первые три номера возобновленного журнала были посвящены вопросам электроснабжения и электрификации, но уже в № 1, 1923 г. в редакционной статье отмечается, что несмотря на важность этих вопросов «Электричество» должно уделять внимание и другим темам, так как «за годы отсутствия в России специального электротехнического журнала в различных областях электротехники накопилось ... много ценного материала, ждущего своего опубликования и обсуждения». Из этой же редакционной статьи можно узнать о намечаемых задачах и структуре журнала.

Редакция предупреждает, что из-за экономии места и обилия вопросов, ждущих обсуждения, предполагает публикацию обзорных статей по отдельным направлениям и в подтверждение принятого решения публикует в этом номере: А. А. Радциг «Новейшие течения в постройке тепловых двигателей; А. Ф. Иоффе «Электрическая природа материи»; А. А. Чернышев «Современное состояние радиотехники»; В. А. Толвинский «Современное динамостроение»; В. И. Коваленков «Современная проволочная связь» и др.

Редакция ставит перед собой и другие задачи: связь с читателем, особенно провинциальным, для чего неоднократно публикует соответствующие анкеты; знакомство русских электротехников с достижениями зарубежной техники; привлечение к сотрудничеству в журнале «известных научных и технических деятелей». Так, уже в первых номерах со статьями выступают Г. М. Кржижановский, В. А. Винтер, В. Ф. Миткевич, В. В. Скобельцын, М. К. Поливанов, А. М. Залесский, К. И. Шенфер и др.

На протяжении долгого времени структура журнала в этот период не меняется: основной раздел, реферирование зарубежных статей и книг, освещение деятельности организаций — издателей журнала, публикация правил эксплуатации электрооборудования, стандартов и других нормативных документов, реклама, на которую в основном и существовал тогда журнал.

О тематике журнала речи в то время не шло. В отсутствие других журналов «Электричество» взял на себя заботу о пропаганде не только электротехники, но и теплотехники, гидростроительства, радиотехники, светотехники, телефонии и телевиде-

<sup>1</sup> Статьи о дореволюционной деятельности журнала опубликованы в № 7, 9 и 10, 1979 г.



Воеводин П. И.

графии и т. д. По этой же причине уровень и характер публикуемых статей были весьма разнообразны, с тем чтобы заинтересовать самого разного читателя — ученого, инженера, руководителя производства, рядового работника промышленности. Такая обширная тематика и широкий диапазон читательских интересов ставили перед редакцией дополнительные трудности, в связи с чем возник вопрос об издании приложения к журналу и о переходе на двухнедельную периодичность для более оперативной информации.

Журнал «Электричество» стремился охватить все проблемы электрификации страны — научные, инженерные, экономические, производственные, организационные.

В № 2, 1922 г. по просьбе редакции со статьей «Текущие проблемы электрификации» выступает председатель Госплана, проф. Г. М. Кржижановский, обсуждению проекта Каширской электростанции посвящены статьи В. И. Худякова и Р. А. Фермана, С. А. Кукель рассказывает о плане электростроительства в РСФСР на 1922—1923 гг. «Электричество» знакомит читателей с электрификацией европейских стран и США, а также с отзывами иностранных ученых о плане ГОЭЛРО. Так, в 1922 г. журнал публикует мнение Ч. Штейнметца о советском плане электрификации России. Известный американский ученый отмечает чрезвычайную ценность и солидность плана, но сомневается в возможности его осуществления в намеченный срок без привлечения американского капитала.

Широкое освещение работ электротехников Запада явилось следствием установления тесных связей редакции «Электричества» с ведущими электротехническими изданиями США, Англии, Франции, Германии, Швейцарии, а также со многими зарубежными фирмами.

В 1923 г. некоторые номера были тематическими. Февральский и отчасти мартовский номера посвящались электрической тяге и подводили итоги I Всероссийской трамвайной конференции, состоявшейся в конце 1922 г. Тема эта была чрезвычайно актуальна, если учесть, что в 20-х годах трамвай был основным видом внутригородских не только пассажирских, но и в особенности грузовых перевозок. Апрельский номер был посвящен проблемам осветительной техники, а октябрьский — применению электрической энергии для нагревания.

Придавая большое значение проблеме электроснабжения, редакция посвящает этой теме № 11, 1923 г., в котором подробно описывается электроснабжение крупных провинциальных городов — Архангельска, Иркутска, Ташкента, Тифлиса, Севастополя, приводятся данные о состоянии работ по объединению электрических станций отдельных районов в соответствии с рекомендациями комиссии ГОЭЛРО, сообщается о программе намечаемой в 1924 г. Всесоюзной конференции по электроснабжению городов и районов. Редакция предупреждает, что будет отводить теме электроснабжения надлежащее место и в следующем году, учитывая ее важность на современном этапе.

В начале 1924 г. мир облетела скорбная весть — умер Владимир Ильич Ленин. Вместе со всем народом горе невосполнимой утраты разделили советские энергетики и электротехники, для которых имя вождя в этот период ассоциировалось с грандиозными задачами электрификации страны. Обращаясь к читателям, журнал писал в № 1, 1924 г.: «Только Ильич понял могущество и роль электричества в народном хозяйстве, превратил его из узкой технической идеи в идеал крестьян и рабочих, связал органически с Советской властью... Действуя среди народной массы, обогащая ее своими знаниями, увеличивая ее хозяйственную мощь применением электричества, вы должны помнить имя той исключительной великой личности, которая эту чудесную власть вложила вам в руки».



Лютер Р. А.



Иоффе А. Ф.

1924 г. прошел для журнала под знаком состоявшейся в июне под председательством И. А. Сканави I Всесоюзной конференции по электроснабжению.

Проведению конференции, которая по существу подводила первые итоги реализации плана ГОЭЛРО, предшествовала большая подготовительная работа, нашедшая отражение на страницах «Электричества».

Резолюции конференции были опубликованы в № 9 и 10, 1924 г. и касались всех строящихся станций, были приняты также решения по энергетическому развитию многих городов и областей страны. Руководители «Электричества» использовали трибуну конференции для популяризации журнала. С докладом выступил М. А. Шателен. По докладу было принято специальное решение, в котором отмечалось, что все основные вопросы в области плановой электрификации и электроснабжения должны находить широкое отражение в журнале «Электричество»; было высказано пожелание об обязательной подписке на журнал всеми предприятиями и строительствами, имеющими в своем ведении электросиловое хозяйство. Большая статья А. А. Горева «О состоянии работ по плановой электрификации СССР» (№ 12, 1924 г.) подводила итоги конференции по электроснабжению и сообщала о ходе работ по реализации плана ГОЭЛРО.

Продолжая традиции основателей «Электричества», редакция посвящала отдельные статьи, а иногда и целые номера выдающимся деятелям русской, советской и мировой электротехники, крупным событиям в жизни электротехнической общественности. Так, № 6, 1924 г. целиком был посвящен 100-летию В. Томсона (lorda Кельвина), № 4, 1925 г. — 30-летию изобретения А. С. Поповым беспроволочного телеграфа, № 2, 1926 г. — 50-летию «свечи Яблочкова», в статье, посвященной памяти Ч. П. Штейнмеца, редакция с благодарностью отмечала помочь американского ученого русским электротехникам.

В 1923 г. была напечатана статья, посвященная 30-летнему юбилею профессорской деятельности замечательного советского ученого М. А. Шателена, на протяжении всей своей жизни принимавшему активнейшее участие в работе журнала «Электричество». Здесь небезынтересно отметить чрезвычайную скромность ученого, его постоянную заботу о журнале, которые побудили Михаила Андреевича обратиться в редакцию со следующим письмом (№ 2, 1924 г.): «Принося глубокую благодарность как редакции, так и председателю VI отдела Русского технического общества за оказанные мне честь и внимание, я все же не могу не выразить сожаления, что на статью эту было потрачено почти две страницы драгоценнейшего журнального места».

29 марта 1925 г. в помещении нынешнего Пассажа открылась выставка по электрификации СССР. В статье, снабженной подробным планом и программой выставки, описанием ее экспонатов, в частности, говорилось: «...выставка по электрификации заключает в себе достаточно данных для наглядной иллюстрации того, что такая электрификация СССР, как ведутся работы по крупному электростроительству, какие цели нам необходимо в этом отношении себе поставить и каким темпом приближаться к их достижению». В этой же статье ставился вопрос о создании национального музея, где в исторической последовательности сосредотачивался бы весь опыт электрификации страны.

Идя навстречу пожеланиям читателей, редакция вводит в 1925 г. «Отдел сообщений» для обмена опытом электростроительных организаций, а также начинает выполнять и другую просьбу читателей о публикации статей по экономическим и финансовым вопросам электростроительства, электропромышленности, электроснабжения. Вскоре в журнале появляются следующие материалы: И. И. Шаров «Динамика заработной платы и производительности труда в электропромышленности», А. Ф. Зайцев «К вопросу о финансировании



Костенко М. П.



Толвинский В. А.

сельской электрификации», Д. П. Фридман «Импорт электроизделий за 1924—25 гг.». Весьма важной теме последней статьи редакция уделяла пристальное внимание на протяжении всего периода 20-х годов, тщательно анализируя причины увеличения или уменьшения ввоза отдельных видов электротехнических изделий и оборудования.

Озабоченность иностранным научно-техническим влиянием выражает также академик А. Ф. Иоффе в статье «Физика и техника» (№ 1, 1925 г.). «Не через американскую технику с запозданием получать плоды науки, — говорится в статье, — а связать русскую технику с русской наукой и в согласованной работе принять участие в мировом прогрессе». Стержнем такой связи, считает ученый, должны стать заводские лаборатории, без широкого развития которых деятельность центральных институтов будет слишком теоретична и бессильна.

Теоретические исследования советских ученых в этот период находят еще слабое отражение в журнале, освещаются в основном иностранные работы, перепечатанные из американских и западно-европейских журналов. Главное место (свыше 50%) занимают статьи, посвященные производственно-техническим и организационным вопросам строительства и эксплуатации электрических станций, сетей, электрификации транспорта.

Из статей, прямо не связанных с основной тематикой «Электричества», следует выделить статью В. Е. Ляхницкого «Проблема защиты Ленинграда от наводнений» (№ 7, 1925 г.), в которой автор рассматривает различные проекты защитных мероприятий и оценивает стоимость необходимых работ. Возможно, эта статья заинтересует и современного читателя, учитывая, что осуществление этих мероприятий становится в наши дни реальностью.

В 1926 г. заканчивалось строительство первой группы электрических станций по плану ГОЭЛРО. Необходимо было учесть опыт их сооружения

в дальнейшем проектировании и строительстве, и редакция заказывает и публикует серию обзорных статей видных специалистов — энергетиков, касающихся отдельных направлений энергетики: опор линий электропередач (Н. И. Сушкин), методов защиты линий от перенапряжений (Л. И. Сиротинский), теплотехнической части станций (М. К. Поливанов), электрического оборудования станций и подстанций (А. А. Чернышев), способов защиты линий связи от вредного влияния линий электропередач (А. А. Чернышев, П. А. Азбукин), высоковольтных изоляторов (А. М. Залесский). Подробное описание пущенной в конце 1925 г. Шатурской станции было дано в статье П. И. Воеводина.

В 1926 г. редакция расширяет публикацию статей по электромашиностроению, прекрасно сознавая, что вопросами генерирования и передачи энергии не ограничивается вся проблема электрификации. Авторами этих статей, посвященных усовершенствованию асинхронных двигателей в направлении улучшения их коэффициента мощности, были известные советские ученые М. П. Костенко, Р. А. Лютер, Д. А. Завалишин, Л. М. Пиотровский. Шире, чем прежде, освещаются другие проблемы электропромышленности, касающиеся трансформаторов, конденсаторов, изоляторов и др.

В № 4, 1926 г. опубликована большая статья С. И. Курбатова «Задачи высшего электротехнического образования в СССР». Это была, пожалуй, первая фундаментальная статья по вопросам подготовки советских инженерных кадров, опубликованная в «Электричестве». Автор перечисляет качества, которыми должен обладать инженер-электрик, формулирует круг задач, которые предстоит решать инженеру в зависимости от конкретного места работы (на электростанции или на заводе, в кабельной сети или на железной дороге и т. д.), и определяет в связи с этим задачи вузов.

Публикацией обзоров состояния энергетики и электропромышленности в отдельных зарубежных странах, описанием работы международных кон-



Кулебакин В. С.

ференций, реферированием иностранных статей и книг редакция стремилась помочь советским специалистам быть в курсе мирового научно-технического прогресса в области электротехники. Деятельность журнала «Электричество» в этом направлении была наиболее развита именно в 20-е годы.

2 мая 1927 г. открылся IX Всесоюзный электротехнический съезд. За шесть лет, прошедшие после VIII съезда, была в значительной степени выполнена программа ГОЭЛРО как по созданию новых станций, так и по обновлению и объединению существовавших, почти полностью реконструирована электропромышленность, создан специальный орган по кредитованию электропромышленности и электроснабжения, большую работу по планированию и установлению норм и правил выполнили Госплан СССР и ЦЭС.

Результаты этой громадной работы, проведенной в короткий срок, представлялись на обсуждение съезда.

Приветствуя съезд, редакция «Электричество» выражала уверенность, «что под руководством такого электрификатора, как Г. М. Кржижановский, съезд блестящим образом оправдает надежды, которые возлагает на него страна».

В 1927 г. страна отмечала 10-летие Великой Октябрьской социалистической революции, и № 11 журнала целиком был посвящен этой знаменательной дате. Редакция обратилась к виднейшим специалистам электростроительства, электроснабжения, электрических машин и аппаратов, электротранспорта, светотехники с просьбой сделать обзор достигнутого за 10 лет власти Советов, наметить задачи на будущее.

Общий обзор электрификации, состояния работ по плану ГОЭЛРО сделал А. А. Горев, в частности, отметивший: «...чтобы в тяжелое время начала двадцатых годов начать и довести до конца такое громадное дело, нужны были гигантские усилия строителей, нужна была твердая воля к созданию новой жизни, нужно было не только строить, но и защищать свое дело от нападок и врагов, и сомневающихся друзей».

О деятельности Центрального электротехнического совета, созданного в 1918 г. по инициативе Л. Б. Красина и А. В. Винтера, рассказал в статье М. А. Шатален.

Обзор гидроэнергетики сделал И. В. Егиазаров. Об успехах сельской электрификации сообщили П. И. Воеводин и Ю. В. Скobel'цын. Задачам электрификации транспорта посвятили статьи П. К. Пешекеров, Э. К. Миткевич, А. Б. Лебедев.

Очень интересной была статья Д. П. Фридмана «10 лет советской электротехнической промышленности». Подробнейшим образом исследовались успехи и недостатки деятельности заводов и организаций электропромышленности, намечались технические, финансовые и организационные мероприятия по улучшению этой деятельности. Вопросам электропромышленности редакция уделяла особое внимание: необходимо было ликвидировать диспропорцию между развивающейся электрификацией и отстающей пока от нее электротехнической промышленностью; велик был импорт электротехнических изделий.

Об успешной работе мощных генераторов, поставленных «Электросилой» и ХЭМЗом для Волховской и других советских электростанций, рассказали в юбилейном номере Д. В. Ефремов и М. П. Костенко. Были помещены статьи по развитию в СССР осветительной техники (П. М. Тихо-деев), изоляторной промышленности (А. М. Залесский), электротехнического образования (В. П. Хащинский).

И все же, несмотря на двухкратное увеличение объема юбилейного номера, редакция не смогла осветить всех проблем. В редакционной статье отмечалось, что, к сожалению, не нашли отражения вопросы деятельности научно-исследовательских организаций, состояния технической литературы, однако предполагалось в ближайших номерах восполнить этот пробел.

Давая общую характеристику деятельности журнала «Электричество» в трудные для страны 20-е годы, следует отметить, что несмотря на частые финансовые затруднения, перебои с получением бумаги (из-за чего объем и тираж журнала были невелики), чрезвычайно широкую и разнообразную тематику (из-за отсутствия в то время других электротехнических изданий), журнал выполнял свою главную задачу — распространение научных идей и передового опыта электрификации СССР.

28 мая 1929 г. V съезд Советов утвердил первый пятилетний план развития народного хозяйства на 1928/29—1932/33 гг. Это важное событие в жизни всей Советской страны определило тематику и содержание журнала «Электричество» на весь дальнейший период его деятельности. «В шесте тетрадок 30-х годов слышится шум знамен первых пятилеток», — говорится в уже цитируемой здесь статье в «Правде» о журнале «Электричество».

«Да здравствует победоносное завершение плана ГОЭЛРО на десятом году его проведения», — сообщает журнал в конце 1930 г.

1930 г. был знаменателен и непосредственно для журнала «Электричество»; в этом году научно-техническая общественность отмечала 50-летие со времени основания журнала. Редакционный совет принял решение печатать в течение всего 1930 г. обзорные статьи о достижениях русской электротехники за последние 50 лет и о перспективах развития электрохозяйства в Советском Союзе. В президиуме торжественного заседания, посвященного 50-летию журнала, — Г. М. Кржижановский, В. В. Куйбышев, В. Ф. Миткевич, М. А. Шатален и др. Среди многочисленных приветствий и поздравлений, полученных редакцией «Электричества», любопытно поздравление от правления Электроимпорта. «Развивайте вашу работу, чтобы сократить нашу», — говорится в нем.

Из вестника достижений русских ученых и инженеров в дореволюционный период журнал «Электричество» в годы советской власти превратился в страстного агитатора и пропагандиста электрификации, борца за выполнение пятилетних

планов в области энергетики и электропромышленности.

Первый пятилетний план в области электро-строительства предусматривал сооружение 42 районных электростанций, в том числе Днепровской, Свирской, Новомосковской и др. В соответствии с этими задачами редакционный совет журнала «Электричество» разработал и опубликовал в № 10, 1931 г. перспективный тематический план журнала до конца пятилетки. Определяющим программу журнала фактором было развертывание работ по составлению генерального плана электрификации СССР, а решение ЦК ВКП(б) о производственно-технической пропаганде призывало редакцию усилить политическое звучание научно-технических задач журнала. Журнал стал выходить два раза в месяц.

В этот период редакция публикует статьи: Ю. Н. Флаксмана «Единая социалистическая система энергетического хозяйства» (№ 13, 1931 г.); А. Ф. Иоффе «Энергетические проблемы, выдвигаемые современной наукой» (№ 14, 1931 г.); П. С. Жданова «Устойчивость параллельной работы станций, питающих асинхронную нагрузку» (№ 14, 1931 г.); А. Н. Ларионова «Передача энергии постоянным током высокого напряжения» (№ 15, 1931 г.); дискуссию о системе электрической тяги (№ 17, 1931 г.); М. М. Вольфа «Задачи электрификации сельского хозяйства СССР» (№ 20, 1931 г.) и др. Публикуется серия статей по экономии цветных металлов, электробезопасности. Несколько статей посвящается перспективным планам электрификации республик — Азербайджана, Украины, Белоруссии, Дагестана. Отмечается 100-летие закона Фарадея — статьи В. К. Лебединского, Г. М. Кржижановского, И. А. Тамма.

Почти каждый номер открывается передовой статьей, освещающей актуальные проблемы технической политики партии и правительства, важные политические события в жизни страны.

10 октября 1932 г. состоялось торжественное открытие Днепровской ГЭС им. В. И. Ленина. В статье «Блестящая страница социалистической электрификации — Днепрострой» (№ 19, 1932 г.) журнал отмечает, что это далеко выходящее за пределы СССР событие приобретает крупное политическое, хозяйственное и техническое значение. Ранее в № 9, 1932 г. в «Электричестве» было дано подробное техническое описание Днепровской станции.

Крупному энергостроительству «Большая Волга» были посвящены статьи в № 2, 1932 г., а в № 12 за этот год был поднят вопрос о кадрах для энергетики. О проекте и начале строительства Московского метрополитена журнал сообщил в № 4, 1932 г. в статье К. С. Финкеля.

В № 1, 1933 г. со статьей об организованном в 1932 г. Энергетическом институте АН СССР, ставшем вскоре одним из издателей «Электричества», выступил Г. М. Кржижановский. Необходимо отметить большую дискуссию, прошедшую в 1933 г. по статье В. С. Кулебакина о переходе на частоту 100 Гц. Несостоятельность такого перехода аргументировали принявшие участие в дискуссии

В. Ф. Миткевич, К. И. Шенфер, К. А. Круг, Р. А. Лютер, А. М. Залесский, В. А. Воронов и др.

В это время, в связи с появлением в конце 20-х начале 30-х годов ряда электротехнических и энергетических журналов, опять возник вопрос о профиле «Электричества». Сторонникам его популяризации возражал редакционный совет в своем новом составе. Возражения основывались на том, что популярность нельзя противопоставлять высокому научно-техническому уровню журнала «Электричество»; руководящий электроэнергетический журнал должен быть рассчитан на квалифицированных работников всех отраслей электрохозяйства, должен быть ведущим в области электротехнической науки.

В начале 1934 г. XVII съезд ВКП(б) принял резолюцию «О втором пятилетнем плане развития народного хозяйства СССР (1933—1937 гг.)», предусматривающую завершение технической реконструкции всех отраслей народного хозяйства на новой энергетической базе.

Задачи энергетической общественности по выполнению решений съезда были определены в статье «За создание научного инженерно-технического общества энергетиков СССР» (№ 13, 1932 г.). В ней, в частности, говорилось, что, если в течение первой пятилетки лозунг борьбы за овладение техникой выражался, в первую очередь, в овладении и усвоении богатого мирового технического опыта, «то во второй пятилетке наряду с этим придется все больше и больше разрабатывать отдельные вопросы самим», поскольку примеров решения их в капиталистических странах не имеется. Большая ответственность в связи с этим ложилась на созданное в 1932 г. Всесоюзное научное инженерно-техническое общество энергетиков.

Тематика журнала «Электричество» была приведена в соответствие с заданиями второй пятилетки; этому во многом помогла проведенная редакцией всесоюзная заочная читательская конференция.

Более конкретные задачи электрификации и электропромышленности во второй пятилетке были сформулированы в статье Г. М. Кржижановского «Электроэнергетика и завершение технической реконструкции СССР» (№ 1, 1934 г.) и В. Ю. Стеклова «Электрификация СССР во втором пятилетии» (№ 17, 1934 г.).

Редакция в эти годы продолжала публикацию статей, посвященных генеральному плану электрификации (№ 1, 2, 3, 6, 9, 15/16, 1932 г.; № 13, 16, 1935 г.; № 21, 1937 г.), единой высоковольтной сети (№ 14, 1932 г.; № 15, 1937 г.), передаче энергии постоянным током высокого напряжения (№ 13, 1936 г.), устойчивости систем (№ 11, 1937 г.), крупному энергостроительству — Свирьгэс (№ 13, 1936 г.), проблеме передачи Куйбышев — Москва (№ 13, 1936 г.; № 12, 1937 г.). Начали появляться статьи по автоматике и телемеханике (№ 21, 1935 г.; № 1, 1937 г.).

Важная роль в реализации одного из решающих заданий второй пятилетки — завершении технической реконструкции народного хозяйства — принадлежала развитию электромашиностроения и

электроаппаратостроения, внедрению электрического привода. Со статьями, помогающими решить многие научные и технические проблемы этих отраслей, выступали в то время в журнале М. П. Констаненко, Р. А. Лютер, В. С. Кулебакин, Е. Г. Комар, Б. П. Анаров, Г. Н. Петров, Л. Р. Нейман, В. А. Трапезников, О. Б. Брон, А. Я. Буйлов, Л. М. Пиотровский, К. И. Шенфер и многие другие. Чрезвычайную важность вопросов электрификации промышленности подчеркнул журнал «Электричество» введением в 1935 г. специальной рубрики «Проблемы электропривода».

Журнал живо откликся на ставшие теперь историческими события тех лет: окончание строительства Беломоро-Балтийского канала (1933 г.), первой очереди Кузнецкого металлургического комбината (1932 г.), первых линий Московского метрополитена (№ 1, 6, 19, 1937 г.) и др.

Актуальные инженерные темы, производственные вопросы, освещавшиеся в журнале в 30-е годы, не заслоняли общетеоретических и физических статей, уровень и количество которых значительно возросли по сравнению с подобными статьями 20-х годов.

В № 11, 1930 г. была опубликована работа А. Ф. Иоффе об электрических свойствах диэлектриков, в том же году статья А. А. Смурова о физической природе явлений при импульсных разрядах, физике атомного ядра были посвящены статьи в № 6/7 и 8, 1933 г. и № 2, 1934 г., о методах борьбы с электростатическими зарядами сообщил Н. Г. Дроздов в № 5, 1935 г. В № 1, 5, 7, 22, 1934 г. прошла большая дискуссия об условности математической трактовки физических явлений.

Специальный раздел журнала знакомил читателей с работами научно-исследовательских институтов.

Увеличение в «Электричестве» научных статей объяснялось некоторой перестройкой его тематики в сторону большего освещения теоретических вопросов в связи с все возрастающим изданием производственно-технических, массовых производственных и популярных журналов электротехнического и энергетического профиля.

По традиции журнал «Электричество» отводил

место для статей, посвященных историческим событиям электротехники. Например, только в 1936 г. были опубликованы статьи к 50-летию электропередач высокого напряжения (№ 1), 40-летию открытия лучей Рентгена (№ 5), 200-летию со дня рождения Дж. Уатта (№ 10).

Вопросы терминологии, технического языка также неоднократно поднимались журналом.

В 1938 г. журнал «Электричество» стал органом Академии наук СССР.

В марте 1939 г. XVIII съезд ВКП(б) утвердил третий пятилетний план развития народного хозяйства СССР (1938—1942 гг.). В области энергетики планом предусматривалось ликвидировать имеющуюся диспропорцию между большим ростом промышленности и недостаточным увеличением мощности электростанций с тем, чтобы рост электростанций обеспечивал создание резервов электрических мощностей.

Статья М. Г. Первухина (№ 6, 1939 г.) направляла усилия энергетиков и работников электропромышленности страны на решение поставленных партией задач.

В № 6, 1938 г. была опубликована статья о высоковольтных генераторах переменного тока, в № 5 и 8 — о развитии отечественного высоковольтного аппаратостроения и задачах изоляционной техники. В 1939 г. в журнале печатались статьи, посвященные электрическим машинам с водородным охлаждением (№ 2), трансформаторостроению (№ 4), автотракторному электрооборудованию (№ 3), электроприводу (№ 4), электросварке (№ 7), кабельной технике (№ 10, 11).

Турбогенератор 1000 МВт, 3000 об/мин был описан в № 10 и 11, 1940 г., о выборе системы электрической тяги сообщалось в № 6, 1940 г., о полупроводниках и их применении в № 8 и 10, 1940 г., о строительстве малых ГЭС в № 9, 1940 г. и в № 5, 1941 г.

Грандиозным планам третьей пятилетки не суждено было осуществиться в намеченный срок. Мирный созидательный труд советских людей был нарушен вероломным нападением фашистской Германии. Вынужденный перерыв наступил и в деятельности журнала «Электричество».



УДК 621.31.71

## Журнал „Электричество” во время Великой Отечественной войны и первых послевоенных пятилеток (1944—1955 гг.)

БУДЗКО И. А., академик ВАСХНИЛ

В 1941 г. вышли только пять номеров журнала «Электричество», и с начала Великой Отечественной войны издание его было временно прервано. Значительная часть авторов и сотрудников журнала была призвана в действующую армию либо

выехала со своими учреждениями и предприятиями на восток страны.

Однако уже с середины 1943 г. началась подготовка к возобновлению издания журнала. Ответственным редактором был назначен выдающийся



Веденеев Б. Е.

советский энергетик и гидротехник академик Б. Е. Веденеев, заместителем Я. А. Климовицкий, и с начала 1944 г. журнал «Электричество» стал вновь выходить в свет.

Первый сдвоенный номер вышел тиражом всего 3000 экземпляров (перед войной тираж журнала составлял 9650 экземпляров) объемом 7,5 авторских листов вместо 14 листов в довоенное время. На первой странице первого номера журнала за 1944 г. помещен новый текст Государственного Гимна Советского Союза и правительственные приветствия строителям Челябинской теплоэлектроцентрали в связи с пуском в эксплуатацию турбогенератора мощностью 100 тыс. кВт. Номер открывается статьей Г. М. Кржижановского «Ленин и электрификация», в которой раскрыто огромное значение теоретических работ В. И. Ленина, связанных с электрификацией, и практическое руководство им электрификацией страны. Большой раздел посвящен экономии электроэнергии, крайне важной в условиях военного времени.

Особое внимание в последующих номерах журнала уделено вопросам восстановления разрушенного войной электроэнергетического хозяйства в освобожденных районах. В № 3, 1944 г. напечатаны правительственные приветствия строителям, пустившим в эксплуатацию агрегат мощностью 50 тыс. кВт Зуевской ГРЭС, восстановившим первый гидроагрегат Баксанской ГЭС. Помещена статья Б. Е. Веденеева и В. И. Вейца «Восстановление Донбасса», освещены вопросы восстановления городского электротранспорта (№ 4 и № 11, 12). По этой теме проведена дискуссия (№ 1, 2, 1945 г.), обстоятельно изложены результаты работы специальной конференции (№ 2, 1946 г.).

В первый же год после возобновления выхода журнал помещает проблемные теоретические статьи, в числе которых необходимо отметить статью будущего президента Академии наук СССР С. И. Вавилова «Ленин и современная физика» (№ 4—6, 1944 г.).

В журнале публикуются статьи виднейших ученых и специалистов, в которых выдвигаются на обсуждение предложения по основным вопросам дальнейшего развития различных отраслей электроэнергетики и электропромышленности. Статьи подвергаются обширному обсуждению в последующих номерах. Первыми были статьи академика К. И. Шенфера «Новые задачи электромашиностроения» (№ 5, 6, 1944 г.), Г. Н. Петрова «Технические проблемы трансформаторостроения», В. И. Коваленкова «Задачи автоматики и телемеханики» (№ 8, 9, 1944 г.); С. М. Брагина «Задачи технического развития кабельной промышленности» (№ 10, 1944 г.).

С 1945 года качество издания журнала значительно улучшилось. Он снова, как и до войны, печатается на хорошей бумаге, выходит в свет ежемесячно, без сдвоенных номеров. Объем номера увеличивается до 10—17 авторских листов, а тираж возрастает до 15 и даже до 25 тыс. экземпляров (№ 1, 1946 г.).

В № 4, 1945 г. помещена передовая статья «Честь и слава советским энергетикам», в которой сообщается о награждении орденами и медалями Союза ССР около трех тысяч работников Наркомата электростанций СССР за успешное выполнение заданий правительства по электроснабжению оборонной промышленности в трудных условиях военного времени. Высоких наград удостоены лучшие электростанции СССР.

Великая Отечественная война приближалась к победоносному завершению, и страна отмечала героическую работу электроэнергетиков. За годы войны мощность электростанций Урала и других восточных областей почти удвоилась. К концу 1944 г. в освобожденных районах введено в эксплуатацию 35 районных электростанций, 80 турбин, 156 котлов. Давно работала на полную мощность Волховская ГЭС, велись работы по восстановлению Днепровской станции. Однако довоенная мощность электростанций еще не была достигнута.



Винтер В. А.



Жданов П. С.

Представляет большой интерес статья в № 8, 1945 г. «Военные электрики в Великой Отечественной войне», в которой подведены итоги самоотверженной работы электриков на фронте. Война нанесла огромный урон советской электроэнергетике: разрушено и повреждено свыше 60 электростанций мощностью 5,8 млн. кВт, 10 тыс. км дальних линий электропередачи, выведено из строя или вывезено в Германию электрооборудование. Необходимо было в кратчайшие сроки залечить эти раны и приступить к дальнейшей электрификации страны.

С № 9, 1945 г. журналом руководит редакционная коллегия: Б. Е. Веденеев (ответственный редактор), А. И. Берг, Ю. В. Буткевич, А. А. Глазунов, М. П. Костенко, В. Ф. Миткевич, Н. Д. Папалекси, Г. Н. Петров, И. А. Сыромятников, А. И. Товстопалов, М. А. Шателен.

Продолжается публикация проблемных статей по перспективным вопросам электромашиностроения (Е. Я. Казовский, № 7, 1945 г.), релейной защиты (Г. И. Атабеков, № 9, 1945 г.), практическим критериям статической устойчивости (И. М. Маркович и С. А. Соловьев, № 3, 1945 г.).

В № 4, 1945 г. помещена большая подборка статей по вопросам развития сельской электрификации, значение которой все более возрастало.

В 1945 году в Президиуме Академии наук СССР, а затем в Центральном Комитете ВКП (б) обсуждалась работа журнала «Электричество». Редакционной коллегии были даны принципиальные установки по всем основным вопросам дальнейшего улучшения издания журнала. Было обращено внимание на важность сочетания в журнале теоретических вопросов с задачами практики.

Все больше места журнал уделяет публикации статей, освещающих новые направления в энергетике и электротехнике, вызванные научно-технической революцией. Достижения в области теоретической и прикладной математики позволили более глубоко исследовать сложные процессы в электри-

ческих устройствах и значительно повысили научный уровень публикуемых работ.

Существенную пользу в улучшении журнала принесли читательские конференции, которые были проведены совместно с ВНИТОЭ в Москве, Киеве, Ленинграде, Свердловске, а также заочные читательские конференции, т. е. отзывы читателей, публикуемые в журнале. Так, только в 1953 г. было опубликовано 17 таких отзывов.

В 1946 году принят пятилетний план восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг. Советская электроэнергетика быстро залечивала раны, нанесенные войной. Уже в 1946 году производство электроэнергии составило 48,6 млрд. кВт·ч и превзошло уровень довоенного 1940 г. В начале 1947 г. введены в строй первые агрегаты восстановленной Днепровской ГЭС имени В. И. Ленина. Электрификация страны развивалась высокими темпами. Особое значение приобретают технико-экономические вопросы, связанные с перспективными задачами электрификации страны. Так, большое значение имели статьи П. Г. Грудинского «О потерях энергии и затратах цветного металла в энергосистемах», В. А. Трапезникова и Ю. С. Чечета «Оптимальные асинхронные двигатели», С. И. Рабиновича «Условия сопротивления и коэффициент полезного действия трансформаторов», А. А. Глазунова «Определение сечений проводов воздушных линий и жил кабелей», Г. В. Сербиновского и А. М. Славского «О тарифах на электроэнергию» (№ 6, 1946 г.), а также обширная дискуссия по этим вопросам в последующих номерах журнала. Обсуждаемые в то время проблемы и рекомендуемые решения остаются весьма актуальными и в настоящее время.

В связи с кончиной Б. Е. Веденеева с начала 1947 г. ответственным редактором журнала назначается профессор Г. Н. Петров, крупный специалист в области электрических машин и трансформаторов. Г. Н. Петров возглавлял редакционную



Петров Г. Н.



Атабеков Г. И.

коллекцию журнала до 1954 года. В № 1, 1947 г. отмечено 75-летие со дня рождения старейшины советских энергетиков Г. М. Кржижановского. В этом же номере помещены статьи: Я. М. Червоненкиса, в которой в полном объеме рассматриваются пути решения основных вопросов передачи электроэнергии постоянным током, и М. П. Коценко и Л. Р. Неймана об электромагнитных процессах в мощных выпрямителях.

В связи с тридцатилетием Великой Октябрьской социалистической революции № 11, 1947 г. посвящен развитию электроэнергетики и электротехники в Советском Союзе за 30 лет. В обзоре из 24 разделов, который занял полностью весь номер журнала и в подготовке которого принял участие большой коллектив специалистов, освещены основные итоги развития электроэнергетики и электротехники и связанные с этой областью техники важнейшие работы и достижения советских ученых и инженеров за годы советской власти.

Журнал продолжает весьма плодотворную практику выпуска специализированных номеров, в которых значительная часть статей посвящена какой-либо отрасли электротехники. Так, в № 4, 1948 г. рассматриваются вопросы высокочастотного электронагрева в промышленности, в № 5, 1948 г. — применения дросселей насыщения, в № 6, 1948 г. — релейной защиты и автоматизации энергосистем.

Интересна опубликованная в № 11, 1948 г. статья А. А. Глазунова и С. А. Геликонского «Экономически целесообразная шкала стандартных напряжений в диапазоне 10—220 кВ», в которой авторы высказались против введения в шкалу напряжений 20 и 66 кВ. Эта статья, а также проект стандарта на шкалу напряжений вызвали на страницах журнала длительную дискуссию. В результате напряжение 20 кВ было все же включено в стандартную шкалу.

В связи с необходимостью сооружения сверх дальних линий электропередачи с большой про-

пускной способностью журнал в том же № 11, 1948 г. публикует статью П. С. Жданова, В. А. Веникова и Г. М. Розанова «Электропередача 400 кВ переменного тока», где для предлагаемого авторами напряжения 400 кВ дан анализ вопросов заземления нейтрали, расщепления проводов, потерь на корону, механического расчета линии электропередачи, а также ее режимов работы и устойчивости. Здесь же помещена статья А. Б. Крикунчика на аналогичную тему.

В июне 1949 г. было принято Постановление Совета Министров СССР о строительстве Куйбышевской гидроэлектростанции на р. Волге и о передаче от нее в Москву до 950 тыс. кВт электрической мощности, т. е. о практической реализации ранее рассмотренных с общих позиций в журнале задач. В августе 1950 г. было начато строительство Куйбышевской электростанции и линии электропередачи 400 кВ Куйбышев—Москва, а также принято Постановление Совета Министров СССР о строительстве Волгоградской гидроэлектростанции на р. Волге и Каховской гидроэлектростанции на р. Днепре с соответствующими линиями передачи.

Научные учреждения и проектные организации страны активно включились в разработку вопросов, связанных с осуществлением грандиозных строек. Журнал «Электричество» обстоятельно освещал результаты этих работ. Из большого числа статей, опубликованных на эти важные темы, следует упомянуть статьи Г. М. Розанова «Расчет расщепленных проводов линий 400 кВ» (№ 6, 1949 г.), В. А. Веникова, Г. М. Розанова и Н. Н. Соколова «Характеристики электропередач переменного тока на большие расстояния» (№ 7, 1950 г.), М. А. Саркисова «Строительство волжских гидроэлектростанций — новый этап в развитии советской энергетики» (№ 7, 1951 г.), Н. Н. Крачковского «К вопросу об экономике протяженных линий электропередачи переменного тока» (№ 11, 1951 г.), А. А. Горева «Пропускная



Сиротинский Л. И.

способность линий трехфазного тока большой протяженности» (№ 12, 1951 г.), Б. С. Успенского «Гидроэлектрические станции большой мощности» (№ 1, 1952 г.).

В 1950 г. исполнилось 70 лет со дня выхода первого номера журнала «Электричество». В редакционной статье, посвященной этой дате, указывается, что журнал призван распространять научные и технические знания об электричестве, критически освещать основные тенденции развития электротехники и ставить на обсуждение неотложные вопросы, связанные с дальнейшим широким развитием электрификации Советского Союза. В журнале должно, в частности, вестись более полное и критическое освещение таких вопросов, как электропередача сверхвысоким напряжением на большие расстояния, защита от перенапряжения в высоковольтных установках, устойчивость работы электрических систем, надежность и экономичность электроснабжения, внедрение электрической энергии в технологические процессы промышленного производства, развитие электротяги, сельской электрификации, электроавтоматики, электромашиностроения и т. д. (№ 7, 1950 г.). В этих направлениях и развивалась деятельность журнала в последующем пятилетии.

В редакционной статье «Величественная победа советского народа» (№ 6, 1951 г.) отмечается, что первый послевоенный пятилетний план успешно выполнен. Выработка электроэнергии в стране в 1950 г. на 87% превзошла выработку довоенного 1940 г. Восстановлены разрушенные во время войны электростанции. В районах, пострадавших от войны, в 1950 г. произведено электроэнергии значительно больше, чем в 1940 г.

На следующее пятилетие 1951—1955 гг. предусматривались высокие темпы дальнейшего развития народного хозяйства Советского Союза и в особенности электроэнергетики. Общая мощность электростанций увеличивалась примерно в два раза, а гидроэлектростанций — в три раза. Производство электроэнергии должно было возрасти в 1955 г. по сравнению с 1950 г. на 80%.

Журнал активно участвует в постановке и обсуждении вопросов, связанных с выполнением работ по реализации нового пятилетнего плана. Широко освещается работа инженерной общественности в этом направлении и, в частности, материалы Пленума Центрального правления ВНИТОЭ в Куйбышеве, который был посвящен строительству Куйбышевской ГЭС и линии электропередачи 400 кВ.

С 1950 г. журнал издает и рассыпает годовым подписчикам в качестве приложения календарь-справочник. Этот справочник издавался в течение нескольких лет и пользовался широкой популярностью, так как содержал полезный материал для практических инженеров и научных работников. Он способствовал привлечению большего числа подписчиков журнала.

В первой половине пятидесятых годов в журнале помещен ряд статей по новым вопросам развития электротехники, которые были актуальны в то время, а многие из них актуальны и в наши дни. В области общетеоретических вопросов значитель-

ное внимание уделялось теории и расчету нелинейных электрических цепей в статьях В. Е. Боголюбова (№ 8, 1951 г.), Э. А. Мееровича (№ 9, 1951 г.), В. Ю. Ломоносова (№ 7, 1952 г.), П. А. Ионкина (№ 8, 1953 г.), Д. М. Казарновского (№ 10, 1953 г.), А. А. Воскресенского (№ 6, 1954 г.), А. С. Касаткина (№ 12, 1955 г.) и др.

По электрическим системам продолжали обсуждаться проблемы дальних линий электропередачи сверхвысоких напряжений в статьях В. А. Веникова и др. Крупным достижением советских электротехников являлась разработка способа самосинхронизации для включения синхронных генераторов электростанций на параллельную работу, о чем сообщалось в статьях И. А. Сыромятникова и Л. Г. Мамиконяца (№ 8, 1954 г.), а об использовании этого способа для сельских электростанций — в статье В. А. Глебова (№ 2, 1955 г.).

Продолжалась публикация работ по исследованиям в области асинхронных электродвигателей, как короткозамкнутых, так и с различными пусковыми устройствами — статьи И. А. Сыромятникова (№ 12, 1951 г.), А. А. Янко-Триницкого (№ 3, 1951 г.), М. С. Левина (№ 2, 1953 г.). Публиковались статьи по определению экономических размеров электрических машин — И. М. Постникова (№ 8, 1952 г.). Исследовались переходные процессы в системе «синхронная машина — возбудитель» — Л. В. Цукерник (№ 10, 1954 г.).

Определенный интерес, в особенности для малых сельских электростанций, которые в то время были основной базой электроснабжения сельского хозяйства, представлял синхронный генератор с самовозбуждением от механического выпрямителя, предложенный С. Г. Таманцевым (№ 12, 1952 г.).

Активно обсуждались вопросы определения электрических нагрузок на промышленных предприятиях. Был предложен ряд новых методов расчета нагрузок, которые получили в последующие годы широкое распространение. В первую очередь здесь следует упомянуть статьи Г. М. Каялова (№ 4, 1951 г., № 12, 1949 г.).

В развитии электрификации сельского хозяйства произошло важное событие: в 1953 г. Совет Министров СССР принял Постановление, в котором устанавливался основной путь электрификации колхозов — присоединение их к сетям государственных энергетических систем и отменялись существовавшие до этого ограничения, тем самым были обеспечены условия для быстрого развития электрификации деревни на современной энергетической базе. В ряде статей, помещенных в журнале и в особенности в передовых статьях «Задальнейший мощный подъем сельской электрификации» (№ 4, 1953 г.) и «Развитие сельской электрификации» (№ 5, 1956 г.), журнал показывает пути, по которым должна идти сельская электрификация, базируясь, как и другие отрасли народного хозяйства, на присоединениях к сетям энергосистем.

С января 1954 г. главным редактором журнала «Электричество» стал Н. Г. Дроздов, заместителем главного редактора — И. А. Сыромятников, членами редакционной коллегии: К. А. Андрианов, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова,

Е. Г. Комар, М. П. Костенко, А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, М. А. Шателен.

В № 7 журнала за 1954 г. опубликовано сообщение Совета Министров СССР о пуске в СССР 27 июня 1954 г. первой промышленной электростанции на атомной энергии полезной мощностью 5000 кВт. «Впервые промышленная турбина работает не за счет сжигания угля или других видов топлива, а за счет атомной энергии — расщепления ядра атома урана. Вводом в действие атомной электростанции сделан реальный шаг в деле мирного использования атомной энергии» — сказано в сообщении. Сейчас, всего через четверть века после этого выдающегося события, когда атомные электростанции получили широкое развитие в нашей стране и во многих странах мира, еще более ясно исключительное значение для всего человечества первенца атомной энергетики, созданного советскими учеными и инженерами.

В 1955 г. журналу исполнилось 75 лет. Юбилейный номер журнала № 7, 1955 г. имел расширенный (до 25 авторских листов) объем, и все же не смог вместить всех юбилейных статей, часть из них была опубликована в следующем номере. В передовой статье, посвященной итогам участия журнала «Электричество» в борьбе за технический прогресс (№ 7, 1955 г.), отмечается большой путь, пройденный журналом, в частности, в период восстановления отечественной электроэнергетики в послевоенные годы. В преддверии нового пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР 1956—1960 гг. редакционная коллегия ставит перед журналом ответственную задачу пропаганды с его страниц новых научных и технических идей и разработок в разнообразных разделах электротехники и электроэнергетики. По мнению редколлегии, изложение материалов должно удовлетворять широкие круги читателей и по своей направленности в большей мере отвечать практическим требованиям их инженерной и научной деятельности. В то же время журнал не может допускать в освещении вопросов упрощенчества или снижения уровня публикуемых статей. Он должен быть рассчитан на читателей, стремящихся расширить свой кругозор и повысить свою квалификацию, т. е. на читателей, которые относятся к научно-техническому журналу творчески. Одна из задач журнала — способствовать критическому разбору как теоретических идей, так и новых инженерных разработок на ранней стадии их выдвижения с целью заблаговременного их обсуждения и своевременного устранения возможных в новых работах недостатков. Особое значение поэтому имеет дискуссионный раздел журнала.

С этими взглядами редколлегии, изложенными четверть века тому назад, можно вполне согласиться и в наше время, когда исполняется сто лет журналу «Электричество». В юбилейных номерах журнала (№ 7 и 8, 1955 г.) помещены основополагающие статьи по главным направлениям электротехники и электроэнергетики. В статье «Ленин и электрификация» академик Г. М. Кржижановский пишет о громадной роли В. И. Ленина в становлении и развитии электрификации Советского Со-

юза, начиная с плана ГОЭЛРО, созданного по его инициативе и под его руководством. Министр строительства электростанций СССР Ф. Г. Логинов, заместитель министра электростанций СССР А. С. Павленко, А. М. Некрасов (техническое управление Министерства электростанций СССР) в своих статьях подводят итоги развития электроэнергетики страны и показывают задачи, стоящие перед ней. За предыдущие десять лет были созданы мощные объединения энергосистем Центра, Юга и Урала, велось строительство крупных тепловых электростанций мощностью 400 тыс. кВт и более с применением пара высоких параметров, мощных гидроэлектростанций на Волге — Горьковской, Куйбышевской и Волгоградской. Успешно осуществлялась автоматизация электростанций, в особенности гидравлических. Закончилось строительство первой линии электропередачи 400 кВ.

В статье заместителя министра электротехнической промышленности СССР Н. И. Борисенко рассмотрены задачи электротехнической промышленности в части создания новых, совершенных электрических машин и оборудования и внедрения на заводах электропромышленности передовой прогрессивной технологии.

Статья М. Г. Чиликина, А. Т. Голована и И. И. Истрова посвящена научно-техническим вопросам электропривода. Одной из основных проблем современного электропривода авторы считают создание регулируемых приводов переменного тока и расширение областей применения простых и надежных в работе асинхронных электродвигателей. Большие задачи предстояло решить в области дальнейшего развития систем автоматического управления электроприводами и комплексной автоматизации технологических процессов.

К началу 1955 г. общая протяженность электрифицированных линий железных дорог более чем в 2,5 раза возросла по сравнению с довоенным уровнем, и И. И. Иванов (Министерство путей сообщения СССР) в своей статье рассматривает научно-технические вопросы электрификации железнодорожного транспорта с учетом ее широкого развития в ближайшие 10—15 лет.

Член-корр. АН СССР Л. Р. Нейман освещает теоретические проблемы современной электротехники. В своей статье он уделяет большое внимание разработке теории нелинейных электрических и магнитных цепей. Другой крупной теоретической областью электротехники является, по мнению автора, разработка методов расчета и исследования электромагнитных полей.

Научным проблемам отечественного электромашиностроения посвящена статья академика АН Армянской ССР А. Г. Иосифьяна. Автор выдвигает задачи анализа переходных процессов электрических машин с учетом нелинейных параметров, нагрева и охлаждения электрических машин, коммутации в машинах постоянного и переменного тока, механической прочности и вибрации. Особо важной задачей автор считает разработку теоретических основ проектирования единых серий машин переменного и постоянного тока.

В больших статьях А. Е. Алексеева, А. С. Еремеева и Р. А. Лютера, а также Е. Г. Комара рас-

смотрены задачи производства крупных гидрогенераторов и турбогенераторов. Перспективам развития в области выключателестроения посвящена статья Г. В. Буткевича и Л. К. Грейнера. Авторы отмечают отставание в этом направлении и считают, что устранить его можно, улучшив использование имеющихся экспериментальных баз и строительства новой мощной испытательной лаборатории.

Вопросам объединения энергосистем на параллельную работу посвятил свою статью И. А. Сыромятников. В ней он показывает преимущества совместной работы энергосистем, рассматривает вопросы диспетчерского управления, обеспечения устойчивости параллельной работы объединенных энергосистем и делает вывод, что широкое строительство электрических сетей позволит объединить на параллельную работу электростанции и энергосистемы и тем самым рационально и полностью использовать наиболее экономичные тепловые электростанции, а также водные ресурсы. Уместно отметить, что в настоящее время в Единую электроэнергетическую систему Советского Союза объединено свыше 80% электростанций страны и ее сети протянулись от западных границ СССР до Читы на востоке.

В статье В. П. Пименова и М. Р. Сонина описывается первая в СССР кабельная электропередача постоянного тока протяженностью 112 км напряжением 200 кВ с передаваемой мощностью 30 тыс. кВт. Она явилась основной экспериментальной базой института постоянного тока для проведения исследований, связанных с практическим осуществлением дальней передачи энергии постоянным током.

Член-корр. АН СССР Б. М. Вул в своей статье рассматривает физические предпосылки технического использования полупроводников. Он описывает принципы действия и кратко приводит данные по выпрямителям, усилителям, фотоэлементам и термоэлементам. В заключение статьи он отмечает, что как ни велика роль, которую полупроводники будут играть в радиотехнике, но еще более существенное значение они приобретут в энергетике. Заканчивается статья следующей примечательной фразой: «Можно надеяться, что в номере «Электричество», посвященном 100-летнему юбилею журнала, будущие авторы дадут всестороннее освещение многолетнего опыта работы полупроводниковых силовых установок». Бурное развитие силовых полупроводников за истекшие четверть века полностью подтверждает это научное предвидение.

Член-корр. АН СССР К. А. Андрианов в статье «Статические полимеры в электрической изоляции» дает краткую характеристику важнейших полимеров и определяет их значение для электрической изоляции. Рассматриваются кремнийорганические и синтетические органические полимеры.

Развитие отечественного конденсаторостроения показано в статье В. Т. Ренне. Он отмечает, что за послевоенные годы советское конденсаторостроение поднялось на новую качественную ступень, превратившись в массовое специализированное производство и обогатив отечественную

технику рядом новых прогрессивных типов конденсаторов.

Развитию физических моделей электрических систем посвящена статья В. А. Веникова и А. В. Иванова-Смоленского. Подводя итог обширным исследованиям, позволившим создать системную модель Московского энергетического института, авторы заключают, что методы теории подобия могут быть с пользой применимы в лабораторных исследованиях и при опытах в системах.

В статье академика М. П. Костенко и И. Д. Урусова описываются электродинамические модели гидрогенераторов Куйбышевской ГЭС, осуществленные в Ленинградском отделении Института автоматики и телемеханики АН СССР. Член-корр. АН СССР В. А. Трапезников в обширной статье, обобщающей исследования института автоматики и телемеханики, рассматривает вопросы теории и практики математического моделирования динамических систем.

Асинхронным режимам синхронных генераторов посвящена статья Л. Г. Мамиконяца. В ней показано, что изучение таких режимов позволило внедрить ряд мероприятий для повышения надежности энергоснабжения. Были приняты решения о допустимости при определенных условиях кратковременной (30 мин) работы в асинхронном режиме без возбуждения для турбогенераторов с массивными роторами ресинхронизации генераторов, выпавших из синхронизма и др. Широкое распространение получил метод самосинхронизации для включения синхронных генераторов на параллельную работу. Нашли использование в энергосистемах автоматическое повторное включение с самосинхронизацией и без контроля синхронизма и асинхронный пуск синхронных генераторов, например, при использовании их в качестве синхронных компенсаторов.

Г. Н. Петров и И. С. Наяшков рассмотрели в своей статье вопросы расчета электродинамических сил в трансформаторах. Эти вопросы стали особенно актуальными в связи с повышением мощности изготавляемых трансформаторов до 100 тыс. кВт в фазе и более. Электрическим микромашинам, которые получили широкое распространение, посвятил свою статью Ю. С. Чечет.

Новую технологию — электроискровую обработку металлов, открытую во Всесоюзном электротехническом институте в 1938 г., описали Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко.

А. С. Займовский изложил современные достижения в области магнитных материалов. Подводя итог, автор устанавливает, что на основе разработанных теоретических положений стало возможным ведение в нужном направлении поиска новых сплавов, композиций и технологических приемов их изготовления, что обогащает отечественную технику новыми высококачественными магнитными материалами.

В юбилейных номерах журнала «Электричество», связанных с его 75-летием, был сосредоточен богатый материал, давший направления для развития теоретических и инженерных работ на длительный период, которому посвящена следующая статья.

# Прогресс электротехники и электроэнергетики и журнал „Электричество” (1956—1979 гг.)

ВЕНИКОВ В. А., доктор техн. наук

Во всей своей деятельности журнал «Электричество» ориентировался на те крылатые слова В. И. Ленина: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны», которые определяли и будут определять общую направленность журнала. Говоря о конкретной программе, отметим, что в рассматриваемый период (1956—1979 гг.) имелись некоторые особенности качественного и количественного развития электроэнергетики, которые потребовали серьезных советов в энергетическом строительстве и развертывании научно-исследовательских работ, способствовавших решению новых практических задач. Отражая эти задачи, знакомя читателя с новыми разработками, журнал своими статьями, сообщениями об опыте работы, дискуссиями подводил многомиллионный коллектив энергетиков к большим и малым проблемам и к их разрешению.

Для современного человеческого общества весьма существенно то обстоятельство, что техника вообще и энергетика в первую очередь в своем бурном развитии вышли за рамки решения чисто инженерных конструктивных задач сооружения тех или иных объектов. Инженер-энергетик уже не является только конструктором технических устройств, а выступает в роли организатора системы. В самом деле, энергетика захватывая примерно одну треть всех материальных ресурсов, которыми располагает человечество, приобретает в настоящее время характер глобальной системы, развивающейся в трех аспектах. Это, во-первых, собственно технический аспект, требующий от инженера умения создавать технически надежные, совершенные и экономически удовлетворительные конструкции. Во-вторых, это экологический аспект, который предъявляет к инженерным сооружениям, помимо прочих, еще и требование минимального отрицательного влияния на окружающую среду. В третьих, это социально-политический аспект.

Изучая содержание журнала за рассматриваемый период, можно убедиться в том, что всем этим трем аспектам на его страницах было уделено внимание даже тогда, когда явно эти аспекты не подчеркивались. Характеризуя количественное развитие энергетики в этот период, следует вспомнить, что в 1956 г. выработка электроэнергии составляла 191 653 млн. кВт·ч, а установленная мощность электростанций 43 470 тыс. кВт (в конце года). Через 24 года (к началу 1980 г.) соответствующие цифры составили 1245 млрд. кВт·ч и 261 млн. кВт. В эти достижения энергетики страны немалый вклад внесла научно-техническая общественность и один из ее старейших органов — журнал «Электричество».

На многочисленных совещаниях, конференциях, научно-технических семинарах и на страницах журнала «Электричество» разрабатывались, уточнялись и обсуждались важнейшие научно-технические и экономические проблемы, способствующие научно-техническому прогрессу в электроэнергетике.

Много внимания уделялось таким кардинальным проблемам, как развитие единой энергетической системы страны, применение дальних передач переменного и постоянного тока, совершенствование систем электропривода, разработка электротехнического оборудования для гидротепловых и атомных станций, повышение эффективности использования электроэнергетики, снижение потерь и т. п.

Вся эта деятельность, в которой достаточно активная часть отводилась журналу с его публикациями, быстро становившимися достоянием широких масс специалистов, способствовала выполнению программ ускорения научно-технического прогресса в области электроэнергетики. Журнал выступал не только в качестве идеолога этого прогресса и развития новых научных идей, но и оказывал активное воздействие на технические решения и, что особенно важно, своевременное практическое претворение идей, заложенных в эти решения.

Широкая тематика журнала, касающаяся как теоретических проблем, так и вопросов производства и распределения электроэнергии, рассматривавшая проблемы электрических систем в целом и их отдельных элементов: электрических машин, трансформаторов, аппаратов, приборов, электротехнических материалов, кабелей, а также разнообразные краткие сообщения, отражающие опыт работы, и дискуссии по опубликованным материалам, — все это в значительной мере помогало решению поставленных перед энергетиками страны задач, способствовало их успешной борьбе за повышение экономичности общественного производства и качества отпускаемой потребителю электроэнергии.

Начало 1956 г. было ознаменовано большим событием — утверждением на XX съезде КПСС Директив по VI пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1956—1960 гг. В качестве одной из первоочередных задач в области энергетики было решение об усилении темпов и улучшении качества строительства, дальнейшего повышения технического уровня тепловых электростанций, гидростанций, электрических и тепловых сетей. Одновременно с дальнейшим внедрением электроэнергии в промышленность намечалось осуществить более широкую электрификацию транспорта и сельского хозяйства, а также улучшить снабжение городов электроэнергией. Директивы предусматривали обеспечение опережающих темпов строительства электростанций и создание ЕЭС европейской части СССР путем подключения Куйбышевской и Волгоградской гидроэлектростанций к Центральной, Южной и Уральской энергосистемам. В связи с этим намечалось строительство ВЛ напряжением 400 кВ. Директивы предусматривали также развертывание работ по объединению Грузинской, Азербайджанской и Армянской энергосистем.

Поставленные задачи получили свое отражение в журнале в виде статей, сообщений и дискуссий. В 1956 г. были опубликованы такие основополагающие статьи, как «Задачи электротехнической промышленности» (№ 3), «Электрификация железных дорог» (№ 4), «Развитие электрификации сельского хозяйства» (№ 5), «Вопросы автоматизации в энергетике» (№ 12). В 1958—1959 гг. публикуются статьи, мобилизующие электротехническую общественность на решение поставленных партией и правительством задач: «Выше уровень деятельности организаций энергетической общественности» (№ 6, 1958 г.) и «Развитие электрификации и электротехнической промышленности в 1959—60 годах» (№ 1, 1959 г.).

В период 1959—1966 гг. публикуются ряд статей, отражающих теоретическую и практическую направленность электроэнергетиков страны на выполнение решений XXI съезда КПСС в области электрификации, наметившего на 1959—1965 гг. введение 58—60 млн. кВт новой мощности, т. е. мощности большей, чем было введено за все предшествующие годы советской власти, и доведение выработки электроэнергии к 1965 г. до 500—520 млрд. кВт·ч, т. е. увеличение ее более чем в 2 раза по сравнению с 1958 г. В своем решении XXI съезд КПСС наметил создание ЕЭС европейской части СССР и Центральной Сибири, а также ряда других объединенных энергетических систем, при этом протяженность электрических сетей 35—500 кВ увеличивалась в 2,5—3 раза. Одновременно предусматривалась электрификация железных дорог протяженностью 20 тыс. км и электрификация всех совхозов, ремонтно-технических станций, колхозов и рабочих поселков.

Конкретные задачи, возникающие при решении этих больших проблем, получили отражение в статьях «Ленин и сплошная электрификация страны» (№ 4, 1960 г.), «40 лет ленинского плана ГОЭЛРО», (№ 2, 1960 г.), где показывалась прямая преемственность идей создания современной ЕЭС и заложенных Лениным в план электрификации России мыслей о системном подходе к задачам энергетики и необходимости развития электрификации страны как базы для перестройки всего народного хозяйства и, по сути дела, основы создания социалистического и далее коммунистического общества. Эти идеи раскрывались в статьях «Великая программа строительства коммунизма» (№ 10, 1961 г.), «Создание материально-технической базы коммунизма и советская энергетика» (№ 11, 1961 г.), а также в статьях «Развитие энергетики в свете решений XXII съезда КПСС» (№ 1, 1962 г.), «Ленинская идея сплошной электрификации страны успешно претворяется в жизнь» (№ 4, 1962 г.). Этим же генеральным энергетическим задачам журнал посвятил ряд общих статей, опубликованных в 1961—1963 гг.

В 1966 г. проходит оживленная дискуссия по теоретическим основам экономически наивыгоднейшего распределения мощностей (№ 8) и по оптимальному регулированию напряжения на электро передачах 500 кВ (№ 10).

Принципиальная направленность советской энергетики нашла отражение и в более поздних

публикациях: «Основные этапы электрификации СССР» (№ 5, 1967 г.), «Осуществление ленинского плана электрификации», «Развитие энергетики и социальный прогресс в свете ленинских идей о значении электрификации» (№ 12, 1970 г.); ряд статей посвящается автоматизации энергосистем (№ 8, 1977 г. и № 3, 1978 г.) и регулированию их режима (№ 9, 1979 г.). Кроме этих основополагающих статей, публикуются ряд кардинальных статей, направленных на решение научно-технических и чисто технических задач развития электротехники и электроэнергетики. Журнал начинает уделять внимание развитию атомной энергетики (№ 7, 1956 г. и др.).

Развитие электрических систем вызывает к жизни новую проблему научных исследований в области энергетического баланса — определение условий экономического режима энергосистем (№ 2 и 4, 1964 г., № 4, 1965 г. и т. д.). Получают отражение проблемы автоматизированного электропривода в этот период (№ 3, 1965 г. и др.). Публикуются важные статьи: «Электричество — на службу сельскому хозяйству» (№ 6, 1964 г.), «Массовая электрификация железнодорожного транспорта» (№ 1, 1964 г.), «Создание и освоение комплексов электрооборудования» (№ 4, 1964 г.).

К концу 1965 г. производство электроэнергии достигает 506 672 млн. кВт·ч, а мощность электростанций составляет 115 033 тыс. кВт.

Новыми задачами, поставленными партией и правительством перед развивающейся энергетикой, характеризуется 1966 г. Так, 9 апреля 1966 г. XXIII съезд КПСС принимает Директивы по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1966—1970 гг. и ставит задачу обеспечения опережающего роста электроэнергетики путем введения в действие 64—66 млн. кВт новых мощностей в основном за счет строительства крупных конденсационных тепловых электростанций мощностью 2,4 млн. кВт и более с установкой преимущественно энергетических блоков единичной мощностью 300 тыс. кВт. При этом предусматривается повышение технико-экономических показателей проектируемых и строящихся гидроэлектростанций путем применения новых технических решений и установки гидроагрегатов мощностью по 500—550 тыс. кВт. Директивы намечают проведение подготовительных работ для передачи большого количества электроэнергии из восточных районов страны в центральные. Предусматривается завершение создания ЕЭС европейской части СССР и увеличение протяженности электрических сетей напряжением выше 35 кВ примерно в 1,5 раза, а в сельских районах напряжением до 20 кВ примерно в 2 раза. Дальнейшая электрификация сельских районов при этом намечается за счет централизованных источников электроэнергии.

Эти задачи, равно как их дальнейшее уточнение и развитие в постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О мерах по дальнейшему развитию энергетики и повышению надежности работы электростанций и энергетических систем в 1968—1970 годах», получают отражение и активно обсуждаются на страницах журнала. Здесь следует упомянуть такие публикации, как «Значение

топливно-энергетических ресурсов Сибири для формирования единой электроэнергетической системы страны», «Важнейшие научно-технические проблемы развития отечественной энергетики» (№ 6 и 11, 1967 г.), а также статьи, касающиеся высоковольтной аппаратуры (№ 9, 1967 г.), стандартизации электротехнического оборудования СССР (№ 10, 1967 г.).

В связи с тем, что в 1967 г. отмечалось 50-летие Советской власти, журнал откликнулся на это большое событие рядом статей: «Основные этапы электрификации СССР» (№ 5), «Электротехническая промышленность за 50 лет» (№ 7), «Развитие сельской электрификации СССР за 50 лет» (№ 8), «Деятельность энергетической общественности за годы Советской власти» (№ 11). Журнал уделил также внимание энергетическому образованию, опубликовав статью «Советская высшая электротехническая школа» (№ 12).

Указанные выше решения партии и правительства, реализации которых определенным образом способствовала научно-техническая общественность, мобилизуемая журналом «Электричество», были успешно выполнены. Так, производство электроэнергии в 1970 г. составило 740 926 млн. кВт·ч, а установленная мощность электростанций к концу года достигла 166 150 тыс. кВт.

В Директивах XXIV съезда КПСС, принятых в 1971 г., было намечено довести производство электроэнергии до 1030—1070 млрд. кВт·ч, ввести в действие на электростанциях мощности в размере 65—67 млн. кВт главным образом за счет строительства тепловых электростанций с установкой на них крупных энергетических блоков. Директивы предусматривали существенное улучшение технико-экономических показателей работы энергетического оборудования, в том числе снижение удельного расхода топлива на электростанциях до 340—342 г/(кВт·ч) отпущенной электроэнергии.

В гидроэнергетике предполагалось осуществлять преимущественное сооружение гидроузлов, позволяющих комплексно решать задачи производства электроэнергии, орошения земель, обеспечения народного хозяйства водой, развития судоходства и рыбоводства. Намечалось значительное развитие атомной энергетики путем строительства крупных электростанций с установкой реакторов единичной мощностью 1 млн. кВт и выше, причем на атомных электростанциях должна была вводиться мощность 6—8 млн. кВт.

Создание ЕЭС страны являлось главной задачей дальнейшего развития энергетики, в связи с чем намечалось сооружение дальних линий электропередачи переменного тока напряжением 750 кВ, а также предусматривалось дальнейшее развитие электрических сетей в сельских районах при соответствующем повышении надежности электроснабжения сельских потребителей. Много внимания в Директивах уделялось повышению производительности труда в электроэнергетике.

Под знаком принятых Директив строилась деятельность журнала «Электричество», который, с одной стороны, мобилизовывал советских электроэнергетиков на выполнение заданий партии и правительства, а с другой стороны, отражал полу-

ченные в научных исследованиях и в практической работе результаты, делая их, таким образом, достоянием широкого круга специалистов. К такого рода статьям в 1971—1975 гг. следует в первую очередь отнести «Воздушные линии ультравысокого напряжения», «Современное состояние сетей 500 кВ в СССР» (№ 1 и 2, 1971 г.).

В 1974 г. ряд статей журнал посвящает 250-летию Академии наук СССР. В них присутствует не только исторический аспект, но и отражаются задачи сегодняшнего дня энергетики и ее перспектив, рассматриваемых в свете задач, вытекающих из решений XXIV съезда КПСС. Уделяется также внимание состоянию и перспективам развития пассажирского и грузового электромобильного транспорта (№ 1, 1975 г.).

В первых номерах журнала за 1976 г. публикуется ряд статей, отражающих новые тенденции в проектировании, сооружении и эксплуатации систем: «Многоуровневый синтез проектных вариантов электрических систем» (№ 1), «Оптимизация уровня резервирования генерирующей мощности в электроэнергетическом объединении» (№ 2), «Планирование процессов развития в энергетике с применением метода игр» (№ 2), «Однофакторный метод краткосрочного прогнозирования суточного потребления» (№ 2), «Современное состояние и проблемы создания турбо-, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов» (№ 3). В последней статье подчеркивалось, что в девятой пятилетке отечественным турбогенераторостроением освоено серийное производство турбогенераторов мощностью 500 и 800 МВт и в ближайшие годы предполагается создание турбогенераторов мощностью 1000 и 1200 МВт.

К началу 1976 г. производство электроэнергии (годовое) составило 1 038 600 млн. кВт, а мощность электростанций достигла 217 484 тыс. кВт.

Состоявшийся в марте этого же года XXV съезд КПСС утвердил «Основные направления развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы», наметив обеспечить в 1980 г. производство 1340—1380 млрд. кВт·ч электроэнергии и ввести в действие мощности на электростанциях в размере 67—70 млн. кВт, в том числе на атомных электростанциях 13—15 млн. кВт. Предусматривалось строительство тепловых электростанций мощностью до 4—6 млн. кВт с установкой энергетических блоков единичной мощностью 500 и 800 тыс. кВт.

Для европейской части СССР предусматривалось опережающее развитие атомной энергетики с ускорением строительства и освоения реакторов на быстрых нейтронах. Намечалось проведение подготовительных работ по использованию атомной энергии для целей теплофикации. Дальнейшее формирование ЕЭС страны намечалось при объединении энергосистем Сибири и Средней Азии с европейской энергетической системой, причем это объединение предусматривало сооружение магистральных линий электропередач 500, 750 и 1150 кВ. Одновременно большое внимание уделялось улучшению технико-экономических показателей работы энергетического оборудования при ускорении в связи с этим создания и освоения высокоманевренных энергоблоков 500 тыс. кВт, строи-

тельство гидроаккумулирующих электростанций и газотурбинных установок. Удельный расход топлива на электростанциях в 1980 г. должен достигать 325—328 г/(кВт·ч), а производительность труда в электроэнергетике возрасти на 27—29%.

В 1976 г. публикуются статьи, посвященные 50-летию советского гидрогенераторостроения: «От Волхова до Енисея» (№ 11), «Электрификация сельского хозяйства в девятой пятилетке и перспективы ее дальнейшего развития» (№ 4), «Применение системных методов для расчета стационарных режимов сложных энергетических систем» (№ 7). Среди большого количества статей по вопросам качества электроэнергии и снижению потерь в электрических системах можно назвать: «Выбор мощности и мест установки устройств компенсации реактивной мощности в сложных электрических системах» (№ 2, 1977 г.), «Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость электрооборудования предприятий» (№ 3, 1977 г.) и др.

В связи с поставленными задачами на десятую пятилетку рассматриваются и обсуждаются вопросы прогнозирования при анализе развития электроэнергетических систем (№ 5, 1977 г.) и вопросы стандартизации номинальных напряжений электрических сетей (№ 7, 1977 г.). В 1978 г. в этом плане публикуются статьи: «Расчет потерь энергии в распределительной сети при неполной информации» (№ 1), «Выбор сечений проводов по экономическим интервалам при реконструкции воздушных линий» (№ 3), «Оценка надежности сложных структур систем энергетики» (№ 4).

Много внимания уделяется принципам управления автоматизированной системой как при проектировании, так и при эксплуатации, в связи с чем публикуются такие статьи, как «Управление автоматизированной системой в проектировании электросетевых объектов» (№ 5, 1977 г.), «Об оценке затрат на развитие сельских электрических сетей в связи с передачей дополнительной электроэнергии» (№ 7, 1977 г.) и др.

В 1976—1978 гг. журнал продолжает публикации, привлекающие внимание энергетической общественности к проблемам электроэнергетики. Здесь и статьи политico-исторического плана (например, № 11, 1978 г.), где подчеркивается значение шефства ВЛКСМ над рядом энергетических объектов, например таких, как строительство атомных электростанций, завода «Атоммаш». Журнал отмечает, что комсомол в 1978 г. шефствовал над строительством 45 важнейших объектов, сооружаемых Министерством энергетики и электрификации СССР.

В конце апреля 1979 г. исполнилось 50 лет со дня одобрения XVI конференцией ВКП(б) и в мае — утверждения V Всесоюзным съездом Советов первого пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР. Это был первый комплексный план, в котором дано научное обоснование темпов и пропорций экономического и социального развития страны. Плановая система — детище социализма, выражение его коренных преимуществ. Ее основы были определены В. И. Лениным, под руководством которого был разработан первый

в мировой практике перспективный народнохозяйственный план — план ГОЭЛРО.

Опубликованные в журнале в 1977—1978 гг. такие статьи, как «Развитие советской электроэнергетики», «Особенности прогнозирования энергосистем» (№ 3, 11, 1977) и уже упоминавшаяся «Ленинский комсомол — шеф электрификации СССР» (№ 11, 1978 г.) отражают весь путь, по которому шло и идет развитие отечественной энергетики от плана ГОЭЛРО до наших дней.

В период 1976—1979 гг. были сделаны особенно значительные шаги по формированию ЕЭС СССР и ее развитию.

В 1977 г. к ЕЭС была присоединена крупнейшая объединенная энергосистема Сибири, после чего производство электроэнергии в ЕЭС достигло почти 90% общей выработки в стране.

В это время была введена линия электропередачи 750 кВ Западно-Украинская подстанция — Альбертира и обеспечена параллельная работа ЕЭС СССР и Объединенной энергосистемы стран — членов СЭВ. Развитие Объединенной энергетической системы стран, входящих в систему СЭВ, во многом способствовало рациональной организации производства в энергосистеме «Мир», которая уверенно обеспечивает энергетическую базу социалистической экономики, ее расширение и углубление в странах-членах СЭВ. Проблемы энергетики стран-членов СЭВ и объединения «Мир» нашли отражение во многих статьях журнала.

Для перспективного развития ЕЭС СССР и связанный с ней энергосистемы «Мир» характерно использование самых новейших достижений энергетической науки и техники. Так, дальнейшее наращивание мощностей в этих системах будет осуществляться главным образом энергоблоками 500—800 МВт на тепловых электростанциях и атомными реакторами по 500—1000 МВт. Мощность отдельных электростанций 3000—4000 МВт. Уже в ближайшей перспективе начнется подготовка к созданию межсистемных связей переменного тока напряжением более 1 млн. В (1150 кВ). Намечается сооружение электропередачи постоянного тока напряжением 1,5 млн. В от электростанций, построенных на угольных месторождениях Экибастуз, в Центральную европейскую часть СССР.

Развитие противоаварийной автоматики, выявляющей возникновение аварийных ситуаций и воздействующей на разгрузку межсистемных связей, на устройства по улучшению устойчивости системы или устройства, осуществляющие деление ЕЭС на сбалансированные и синхронно работающие части, нашло отражение во многих статьях по вопросам устойчивости: «Применение УВМ для расчетов устойчивости» (№ 6, 1966 г.), «Устойчивость слабых связей» (№ 9, 1968 г.), «Обеспечение устойчивости систем, содержащих мощные синхронные генераторы» (№ 12, 1971 г.) и др.

Дальнейшее развитие ЕЭС СССР, увеличение числа связей между отдельными энергосистемами, создание многоконтурной системообразующей сети 500 и 750 кВ, а в дальнейшем и 1150 кВ приведут в ближайшем будущем к необходимости пересмотра принципов построения противоаварийной автоматики, создаваемой на основе использования

новых устройств повышенной надежности, селективности и быстродействия и новых методов обеспечения параллельной работы энергосистем в большинстве аварийных ситуаций. Это автоматика, в первую очередь профилактическая, будет предусматривать сбор очень большого объема информации по режимам, состоянию схемы объединенных энергосистем и аварийным возмущениям, а также передачу этой информации на большие расстояния по каналам связи. Существенной особенностью этой будущей автоматики по сравнению с используемой в настоящее время будет ее глобальность, т. е. охват всей территории ЕЭС десятью-двадцатью автоматическими системами, управляемыми ЭВМ с координацией их действия на ЦДУ ЕЭС СССР. При этом намечается переход к вычислительным машинам 3- и 4-го поколений, широкому использованию микропроцессоров и миникомпьютеров.

Особое внимание в развитии энергетики обращается на повышение эффективности производства. Так, к концу десятого пятилетия резко увеличивается производительность труда в электроэнергетике (плановая цифра 30%), а удельный расход топлива на электростанциях снижается примерно до 325 г/(кВт·ч) отпущеной энергии. Упомянутые выше проблемы, лежащие в основе деятельности журнала, получали освещение во многих статьях, полностью перечислить которые не представляется возможным.

Внимание энергетической общественности привлекают также и острые дискуссии по актуальным вопросам, относящимся, например, к нормированию качества напряжения, нормированию уровня безопасности, построению электрических сетей, распределению в них источников реактивной мощности, определению надежности и ко многим другим.

Кроме рассмотренных выше статей, носящих принципиально общий характер и намечающих генеральные направления в электроэнергетике и ее отраслях, журнал уделяет много внимания отдельным, быть может также не менее значимым, теоретическим и конкретным научно-техническим проблемам. Очень приближенно эти проблемы можно разделить по следующим группам: 1) принципиальные, развивающие и уточняющие теорию физико-математические исследования, относящиеся к области теоретической электротехники; 2) исследования, относящиеся к развитию теории и практики прогнозирования, проектирования и функционирования мощных объединенных электрических систем; 3) разработка вопросов, относящихся к теории и практике создания электропередач высокого напряжения переменного и постоянного тока; 4) теоретические и методические исследования по автоматическому регулированию и устойчивости электрических систем и их элементов; 5) исследования электрических машин и трансформаторов; 6) расчет и эксплуатация электрических аппаратов; 7) важные практические и интересные в теоретическом плане задачи, решаемые и рассматриваемые в группе проблем, посвященных вопросам электротехнологии и электропривода; 8) вопросы электрификации транспорта и связанные с этим многочисленные задачи, касающиеся

электропитания транспортных установок и их влияния на общую электрическую систему.

Разумеется, изложить сколько-нибудь обстоятельно те многочисленные глубокие в теоретическом отношении или важные в практическом плане публикации по упомянутым выше восьми направлениям в рамках одной статьи невозможно. Попытаемся дать только их краткую характеристику в рассматриваемый период.

Первая группа публикаций, относящаяся к теоретическим вопросам, характеризовалась большим числом статей (примерно 350). Для журнала было характерно регулирование направленности тематики статей так, чтобы теоретические проблемы увязывались с теми практическими проблемами, которые в 60-х годах вставали перед энергетиками страны: создание ЕЭС, завершение строительства каскада волжских электростанций, мощных ГЭС в Сибири и, наконец, строительство атомных электростанций, работающих на медленных, а в будущем на быстрых нейтронах, разработка МГД-генераторов и возникающие в связи с этим задачи проектирования и изготовления совершенно нового и в значительной мере уникального электроэнергетического оборудования. Указанные проблемы требовали теоретического исследования сложных электромагнитных и электромеханических процессов на базе теории автоматического регулирования, все в большей степени рассматривавшей применение цифровых элементов.

Развивающиеся работы по термоядерному синтезу и МГД-генераторам привели к исследованию уникальных магнитных систем, уточняющему и даже по-новому ставящему многие задачи теории поля. Обычные электрические машины в связи с ростом их мощности также потребовали нового подхода к решению задач электромагнитных и тепловых полей. Исследование этих сложных вопросов затруднялось невозможностью получения общих аналитических выражений, в связи с чем значительная часть работ проводилась с помощью физического и математического моделирования, получившего в рассматриваемый период новое интенсивное развитие: «Моделирование электрических систем» (№ 1, 1971 г.), «Электрические поля в анизотропных средах» (№ 3, 1956 г.) и др.

Много внимания уделялось разработке расчетных методов, позволяющих исследовать электромагнитные поля в различного рода нелинейных средах. Сюда надо отнести ряд публикаций, посвященных поверхностному эффекту в ферромагнитных телах, работы по определению индуктивностей, емкостей различного рода электрических контуров, представляющих собой практически важные энергетические конструкции. Здесь намечалась определенная тенденция к объединению задач теории цепей и теории полей, так как именно таким образом удавалось получить практически важные решения.

Развитие теории и практики частотных методов исследования переходных процессов, рассмотрение ряда элементов электрических установок или даже установок в целом в качестве объекта, для которого могут быть определены передаточные и входные функции, позволили получить практически важные

расчетные методы и приемы, нашедшие использование в теории переходных процессов в электрических машинах, аппаратах и электрических системах в целом. Публикации, касавшиеся анализа и расчета нелинейных электрических и магнитных цепей, позволили подойти к созданию графоаналитических методов расчета установившихся режимов. Разработанные и опубликованные методы и приемы сделали возможными инженерные расчеты сложных устройств и установок, исследование которых до этого встречало большие трудности. Большое количество публикаций относилось к линеаризации тех нелинейных задач, к которым неизбежно приводила практика исследования реальных электрических цепей, замещающих участки сложных подсистем. Кусочно-линейная аппроксимация широко применялась при исследованиях и разработках машин, аппаратов и преобразовательных устройств, необходимых для создания дальних электропередач. В публикациях, посвященных качественным методам анализа процессов в нелинейных цепях, большое внимание уделялось методам фазовой плоскости, исследованию ряда явлений, происходящих в нелинейных цепях.

Возможности цифровой вычислительной техники привели к появлению новых способов и приемов расчета при решении электротехнических, электроэнергетических задач. В связи с этим появилось большое количество публикаций, отражающих использование различного рода программ и алгоритмов для численных исследований самых различных процессов, происходящих в цепях, системах и аппаратах. Алгоритмы для расчета электрических полей и цепей основывались на теории численного решения дифференциальных уравнений при широком применении итерационных процедур. Для решения задач теории поля стали использоваться методы представления дифференциальных уравнений в виде систем алгебраических уравнений. Кроме того, стала широко применяться и численная реализация аналогов интегральных уравнений поля.

В связи с тем, что упоминаемые задачи, как правило, приводят к системам дифференциальных уравнений, а решаемые уравнения обладают весьма высокими порядками и большим разбросом собственных значений коэффициентов матриц, большое значение приобрели специальные приемы решения таких уравнений и целесообразный выбор шага интегрирования. Эти вопросы нашли отражение в ряде статей, опубликованных в журнале. Публикации рассматриваемого периода отражают две тенденции.

С одной стороны, определенный синтез различных направлений, ранее казавшихся далеко отстоящими друг от друга. Так, например, сблизились методы исследования гидродинамики и газодинамики, определенным образом вошедшие в область электродинамики, некоторые задачи электротехнологии стали близко соприкасаться с биологией и медициной, тесно касаясь процессов, происходящих в живых организмах (например, «Электрические сигналы в организме животных и человека» (№ 6, 1976 г.).

С другой стороны, происходил процесс дифференциации электротехнических научных направлений. Отчасти этот процесс можно считать закономерным, поскольку теоретические разработки идут от конкретных областей практической работы, но все же нельзя не отметить, что в основном эта дифференциация происходила за счет слишком узких, чрезвычайно локальных тенденций и, что особенно существенно, в большей мере была связана с терминологией, обозначениями и графическими представлениями, чем с действительно глубокими причинами, требующими такого различия. Поэтому надо считать ближайшей задачей редакции журнала, вытекающей из анализа статей рассматриваемого периода, определенное регулирование тенденции авторов отдельных статей в направлении сближения не только решений задач, рассматриваемых в этих статьях по существу, но и сближения самих статей по форме изложения.

Условно выделенная нами вторая группа статей относилась к принципиальным вопросам проектирования и прогнозирования больших электрических систем. Здесь следует отметить ряд статей и большую дискуссию, касавшихся применения электропередач постоянного тока в Советском Союзе (№ 1, 2, 1977 г.). При исследованиях, проектных и эксплуатационных расчетах электрических систем стала широко применяться вычислительная техника. Ее использование получило отражение в ряде основополагающих публикаций, сделанных группами специалистов. Можно упомянуть статьи «Современное состояние применения вычислительной техники при эксплуатации и проектировании энергетических систем» (№ 11, 1960 г.), а также ряд статей, посвященных отдельным вопросам, например «Применение математических машин непрерывного действия для исследования переходных процессов в электрических системах» (№ 3, 1960 г.).

Вопросы методики технико-экономических расчетов в энергетике получили отражение в ряде статей (например, № 9, 1961 г.; № 2, 1974 г., № 6, 1974 г.), а также в дискуссиях (№ 11, 1974 г.). В этот период для анализа и определения электрических нагрузок стали широко применяться статистические методы расчета, пропагандируемые в ряде статей, помещенных в журнале. В этом же плане была опубликована статья «Некоторые вопросы прогнозирования затрат, связанных с сооружением высоковольтных сетей, на дальнюю перспективу» и ряд других аналогичной тематики.

Значительное внимание привлекает вопрос о методике экономического распределения активных мощностей в смешанной энергосистеме и вопросы, относящиеся к выбору наиболее экономичного состава включенных агрегатов (№ 1, 1962 г.) и др. В этой проблеме специально выделяются вопросы выбора оптимального числа работающих агрегатов на гидростанции и принципы построения автооператора (№ 8, 1963 г.). Принципы определения эффективности гидроэлектростанции более широко рассматривались в статьях и дискуссиях (№ 1, 1963 г.; № 3, 1963 г.; № 6, 1963 г.).

Внимание специалистов-энергетиков привлекают вопросы передачи электрической энергии на дальние расстояния, повышения напряжения воздуш-

ных линий электропередач (№ 2, 5, 1963 г.). Задачи научных исследований энергетического баланса (№ 2, 1964 г.) получают отражение в последующих статьях: «О формах условий экономичного режима энергосистемы с тепловыми станциями» и «Оптимизация градиентным методом режимов объединенных энергосистем, имеющих в своем составе гидроэлектростанции» (№ 4, 1964 г.).

В расчетах нормальных режимов электрических систем начинают учитываться регулирующие устройства. Эта прогрессивная тенденция получает отражение в ряде публикаций, например, «Расчет режима регулируемого трансформатора с учетом статических характеристик энергосистемы» (№ 12, 1965 г.).

В рассматриваемый период проходит дискуссия относительно возможности повышения частоты переменного тока и нахождения ее оптимального значения для отдельных отраслей энергосистем и возможно энергосистем в целом. Здесь выявляется ряд весьма положительных возможностей для повышения частоты в автономных энергосистемах кораблей, самолетов, отдельных энергопредприятий, колхозов и совхозов. Поднимать вопрос о повышении частоты энергосистемы в целом признается не нужным.

Вопросы качества электроэнергии, которым так много внимания уделяется в настоящее время, уже в начале 60-х годов получили свое отражение в ряде опубликованных статей, например, «Определение народнохозяйственного ущерба в промышленности при отклонениях напряжения» (№ 5, 1966 г.). Такие статьи, как «Оценка показателей надежности элементов энергетических систем», «Расчет эксплуатационной надежности релейной защиты», «Влияние профилактического контроля на результирующую надежность релейной защиты», опубликованные в № 4, 1968 г., знаменуют собой появление особого внимания к вопросам надежности. Определенным образом с проблемами надежности связываются и работы, посвященные анализу режимов. В этом же плане следует отметить работы по обеспечению надежного снабжения потребителей энергией, например, «Применение теории массового обслуживания к расчету колебаний электрических нагрузок» (№ 10, 1968 г.). К аналогичным проблемам примыкают и вопросы надежности сложных систем электроснабжения промышленных предприятий (№ 1, 1970 г.) и др.

Общие оптимизационные задачи разных направлений получают свое отражение в многочисленных работах, таких как «Использование метода ветвей и границ» (№ 7, 1970 г.) и ряде статей в журналах за 1971, 1974, 1975 гг. и последующие годы.

Развитие автоматики позволяет по-новому ставить вопросы автоматизации управления нормальными режимами и процессом проектирования электрических систем. Здесь характерно появление таких статей, как «Некоторые алгоритмические проблемы управления нормальными режимами энергетических систем» и «Принципы автоматизированной системы проектирования линий электропередач» (№ 8, 1971 г. и № 2, 1973 г.) и др. Завершение формирования ЕЭС страны — главного

направления развития энергетики в 1976—1980 гг. — привлекало внимание авторов многих статей, опубликованных как до 1976 г., в которых подготавливались основы будущих решений, так и более поздних статей, в которых описывались уже принятые решения. Так, еще в № 1, 1959 г. находим статьи «Основные режимные принципы автоматического регулирования частоты и активной мощности в объединениях энергосистем и ЕЭС» и «Пути автоматизации регулирования частоты и активных нагрузок в энергосистемах». В № 1, 1965 г. рассматриваются вопросы применения вычислительных устройств в системе комплексной автоматизации энергетических объединений. В № 1, 1975 г. изучается наблюдаемость электроэнергетических систем — проблема, имеющая большое значение для дальнейшего развития управления системами.

В 1977—1979 гг. ЕЭС Советского Союза уже охватила территорию свыше 10 млн. км<sup>2</sup> с населением более чем 220 млн. чел., установленная мощность входящих в ЕЭС 90 энергосистем, сгруппированных в девять ОЭС, намного превысила 200 млн. кВт. Основной системообразующей сетью ЕЭС страны стала сеть 500 кВ.

Разумеется, этот новый уровень управления энергетикой получил свое отражение в журнале: «Автоматизация регулирования частоты и активной мощности в ЕЭС СССР», «Оценка качества исходных данных и точности результатов при определении режима электрической системы» (№ 8, 1977 г. и № 6, 1978 г.). Эта тематика продолжается в 1979 г. статьей «Экспериментальная цифровая система автоматического регулирования частоты и активной мощности ЕЭС СССР» (№ 3). Характерно внимание к вопросам учета вероятностных факторов при управлении режимом. В той или иной мере эта проблема получает свое отражение в многочисленных статьях: № 4, 1966 г.; № 10, 1967 г. и более поздних.

Приближение к завершению создания ЕЭС Советского Союза характеризуется работами, рассматривающими роль дальних передач в энергобольшинстве и выбор системы номинальных напряжений электрических сетей в энергообъединениях и ЕЭС СССР (№ 7, 1972 г., а также ряд предшествующих и последующих статей).

Оценка перспектив дальнейшего развития энергетики страны с использованием принципиально новых решений дается в таких публикациях, как «Новые способы получения электрической энергии» (№ 1, 1973 г.), «Об электрической природе материи и перспективах электротехники» (№ 7, 1976 г.), а также «Создание устройств, управляющих режимами электроэнергетических систем на основе явления перехода веществ из одного состояния в другое» (№ 12, 1978 г.). В этих статьях ставится принципиальный вопрос о необходимости освоения новых, более совершенных видов энергетических устройств, отражающих в своей конструкции последние достижения науки. В них подчеркивается, что в аспекте электротехники прогресс связан с практическим использованием фундаментальных достижений физики и смежных наук, раскрывающих новые возможности генерирования, преобразования и передачи энергии, а также быстрого

управления потоками мощности в нормальных и аварийных режимах.

Как уже отмечалось, вопросы создания единой энергетической системы, которые были в центре внимания журнала, требовали также большого внимания к электропередачам. Часть статей на эту тему относилась к конкретным задачам, например, «Об экономичности применения расширенных (увеличенного диаметра) проводов на линиях электропередач высокого напряжения» (№ 9, 1963 г.), появление других статей было вызвано принципиальными изменениями в технике передачи энергии переменным током: «О нетрадиционных способах передачи энергии с использованием глубокого охлаждения» (№ 5, 1971 г.), «Управляемые электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности» (№ 12, 1969 г.), «Регулирование режима электрических систем и дальних электропередач и повышение их устойчивости при помощи управляемых статических ИРМ» (№ 6, 1967 г.).

Журнал рекомендует к применению предложенные впервые в СССР статические источники реактивной мощности. Их возможности, преимущества получают свое отражение в таких статьях, как «Управляемый статический источник реактивной мощности» (№ 1, 1969 г.), «Исследование эффективности регулирования напряжения в сети металлургического комбината с помощью ИРМ» (№ 1, 1969 г.). В журнале публикуются казавшиеся сначала дискуссионными статьи, посвященные повышению напряжения электропередач сверх 1000 кВ. Таковы, например, статьи «Воздушные линии ультравысокого напряжения» (№ 1, 1971 г.), «Исследование развития искрового разряда в длинных воздушных промежутках» (№ 3, 1971 г.). Такого рода статьи помогают преодолеть привычное представление о физической нереальности дальнейшего (сверх 750 кВ) повышения напряжения, призывают к активному поиску новых решений для электропередач сверхвысокого напряжения.

С проблемами повышения напряжения тесно связаны задачи увеличения длины линий передач, увеличения передаваемой по ним мощности, поэтому естественно, что в рассматриваемый период в журнале появляются работы, связанные с созданием электропередач 1150 кВ. Определенное отражение на страницах журнала получило исследование влияния электрического поля на человека, нахождение тех значений градиента, при которых это влияние не представляет опасности.

Проблема передачи электроэнергии постоянным током имела свои отклики в виде ряда статей, многочисленных выступлениях в дискуссиях. Таковы статьи в журнале № 2, 6, 1967 г., в № 3, 1969 г., в № 6, 1978 г. и др. Последние публикации этого рода рассматривают технику передачи постоянным током в новых аспектах, например, изучаются перспективные области применения электропередач и вставок постоянного тока (№ 3, 1978 г.).

В последнее время проблема устойчивости начинает все более уверенно рассматриваться не в аспекте анализа (когда при заданных начальных условиях определяется поведение системы), а в аспекте синтеза (когда задаются заранее желатель-

ные результаты, обеспечиваемые с помощью устройств автоматического регулирования). Именно такого рода тесная связь проблем устойчивости и проблем автоматического регулирования прослеживается во всех публикациях, проходивших в журнале в этот период. Здесь и большая принципиальная статья «Вопросы автоматизации в энергетике» (№ 12, 1956 г.), и статьи «Об устойчивости электрических систем» (№ 1, 1957 г.), «Анализ статической устойчивости сложных энергосистем при помощи электронных счетных машин» (№ 7, 1957 г.).

Поскольку исследование устойчивости и соответствующей автоматики, которая теперь все надежнее обеспечивает эту устойчивость, требует экспериментальных исследований, то широкое применение динамических (физических) моделей энергосистем получает активное отражение на страницах журнала в виде многочисленных дискуссий, опубликованных в 1958 г. Особенно надо отметить дискуссию, связанную с критикой теории устойчивости энергосистем, рассматриваемых как позиционные системы, и выявление несостоятельности этой критики (№ 5, 1974 г.).

Журнал привлекает внимание читателей к ряду практических результатов, полученных в энергосистемах. Такова, например, статья «Испытания устойчивости электропередачи Волжская ГЭС им. В. И. Ленина — Урал» (№ 8, 1962 г.). Развитие теории, многочисленные исследования устойчивости электрических систем, проведенные аналитически на физических моделях, и эксперименты в системах позволяют подойти к созданию документа об основных положениях по определению устойчивости энергетических систем (№ 12, 1963 г.).

Развитие методов регулирования возбуждения генераторов и регулирования турбин, которое проводится в соответствии с упомянутыми выше основными положениями, приводит к широкому внедрению автоматического регулирования сильного действия. Соответствующие исследования получают свое отражение в таких публикациях, как «Работа электрических систем с АРВ сильного действия вблизи границы области устойчивости», «Регулирование сильного действия, осуществляемое с применением третьей и четвертой производных абсолютного угла» (№ 3, 6, 1964 г.).

В дальнейших исследованиях получают широкое применение цифровые и аналоговые вычислительные машины. Результаты их применения находят свое отражение в статьях, помещенных, например, в № 9 и 10, 1968 г., 2 и 5, 1970 г. и др. Особое внимание уделяется созданию и применению специализированных ЭВМ, чьему были посвящены такие публикации, как «Аналоговая машина для исследования переходных электромеханических процессов в энергосистемах», «Исследование статической устойчивости автоматически регулируемых электрических систем», «Приближенное определение максимальной передаваемой мощности от удаленной станции и настройки автоматических регуляторов возбуждения по отклонению напряжения» (№ 5, 12, 10, 1965 г.). Наряду с развитием теоретических исследований, отраженных в многочисленных статьях, среди которых можно упомянуть «Анализ при помощи ЦВМ электромеханических

переходных процессов в сложной энергосистеме», «Функции Ляпунова, как критерий синхронной динамической устойчивости», «Исследование при помощи ЦВМ статической устойчивости сложных автоматических регулируемых электрических систем» (№ 4, 6, 11, 1967 г.), внимание уделяется дальнейшему развитию экспериментальных исследований устойчивости в объединенных энергосистемах (№ 6, 1967 г.).

Таким образом, рассматриваемый период имеет тенденцию к сопоставлению данных экспериментов и формализованного исследования, что получает свое отражение в ряде статей, например, «Вопросы алгоритмизации переходных процессов в автономных электрических системах» (№ 12, 1967 г.).

Упоминавшаяся выше тенденция к синтезу подтверждается рядом статей, среди которых можно упомянуть «Применение дифференциальных связей для синтеза простых самонастраивающихся систем автоматического управления» (№ 1, 1968 г.). Применение методов автоматического регулирования получает свое развитие не только в задачах регулирования возбуждения, но и в широком отражении всех этих методов при разработке противоаварийной автоматики в энергосистемах СССР (№ 3, 1970 г.). Решение этой проблемы отражает тот высокий уровень автоматического регулирования и автоматического управления, которого достигла электроэнергетика Советского Союза, значительно превысив уровень передовых в техническом отношении зарубежных стран.

Новые конструкции синхронных машин, так называемых асинхронизированных, и работа генераторов этих конструкций в энергосистемах отражаются в статьях «Промышленные испытания асинхронизированного синхронного генератора» и «Реактивная мощность управляемой машины переменного тока» (№ 4, 9, 1979 г.). Нужно отметить, что эти генераторы, существенно облегчающие решение проблемы устойчивости энергосистем, успешно работают, в частности, на Иловской гидроэлектростанции, о чем сообщал журнал в статьях в № 3, 1971 г.; № 4, 5, 1973 г.; № 11, 1974 г.

Переходя к вопросам электрических машин, надо отметить, что их конструкциям, эксплуатации и технологии производства журнал всегда уделял достаточно много внимания. В анализируемый период на его страницах появляется целый ряд статей, уточняющих вопросы электромеханических переходных процессов в синхронных машинах (№ 8, 1957 г.) и рассматривающих вопросы гашения поля синхронных машин (№ 7, 1957 г.). Развитие энергетической системы и создание высоковольтных передач требуют разработки высоковольтных автотрансформаторов для энергетических систем (№ 5, 1957 г.). Особые режимы электрических машин требуют специального изучения, что отражено в статье «Токи и моменты асинхронных и синхронных машин при изменении скорости их вращения» (№ 8, 1958 г.), а упомянутые выше требования к созданию нового оборудования для энергетических систем получают отражение в статьях «Синхронные компенсаторы для дальних электропередач», «Опытный турбогенератор с внутренним водородным охлаждением» (№ 9, 10, 1958 г.).

Синхронные генераторы без щеточного контакта, представляющие большой интерес для улучшения условий их эксплуатации в энергосистемах, описываются в ряде статей (например № 3, 1961 г.), проблемы регулирования напряжения в автотрансформаторах, имеющие большое значение для эксплуатации энергосистем, рассматриваются в соответствующих статьях (№ 7, 1961 г. и др.), а теоретические вопросы работы электрических машин освещаются в статье «Преобразования цепей при анализе электрических машин» (№ 4, 1961 г.) и ряде других публикаций.

Большой интерес представили статьи «Универсальные механические характеристики асинхронных машин с учетом скорости изменения скольжения» (№ 1, 1963 г.) и «Определение пусковых характеристик синхронных двигателей» (№ 6, 1964 г.). Как и другие статьи этого направления, они имели большое значение для правильной эксплуатации электрических систем.

Явление сверхпроводимости открыло принципиально новое направление в развитии электромашиностроения. Опубликовав в № 6, 1964 г. статью «Применение сверхпроводников для возбуждения электрических машин», журнал затем часто возвращался к этой важной проблеме.

Эксплуатация мощных машин в энергосистемах потребовала от энергомашиностроения указания точных параметров выпускаемых электрических машин. В связи с этим был поставлен ряд специальных исследований, получивших отражение на страницах журнала в таких статьях, как «Экспериментальное исследование гидрогенератора СВ-1500/200-99» и «Исследование переходных процессов в турбогенераторах методом частотных характеристик» (№ 2, 1964 г.) и многих других. К этим же проблемам можно отнести и ряд публикаций, в которых уточнялись, например, некоторые вопросы расчета специальных режимов асинхронных короткозамкнутых двигателей (№ 11, 1965 г.). Определению оптимальных размеров электрических машин было посвящено несколько публикаций и проведена дискуссия (№ 3, 1966 г.).

Автоматическое регулирование возбуждения, которое в рассматриваемый период получило большое значение и начало широко применяться в практике работы энергосистем, стало оказывать влияние и на требования к конструкции электрических машин. Так, при конструировании гидрогенераторов предлагается отказаться от так называемых улучшенных параметров, т. е. увеличения механической инерции, снижения электромагнитной инерции и реактивных сопротивлений, что удорожало машину (например, «О влиянии регулирования возбуждения на пропускную способность дальних передач», № 11, 1956 г.). Вместо этого рекомендуется применять сильное регулирование возбуждения, более дешевое, чем упомянутые выше конструктивные изменения, и в то же время достаточно надежное. Принципиальные возможности развития машиностроения для решения задач создания единой энергетической системы были освещены в статье «Состояние и перспективы развития энергетики и электропромышленности». В этой статье ставились задачи создания новых мощных гидро- и турбоге-

нераторов (до 1000—1500 МВт) и ряд других принципиальных вопросов электроэнергетики.

Проблемы электроаппаратостроения, электро-привода и электротехнологии также получили свое отражение на страницах журнала в свете тех генеральных задач, которые ставились перед работниками промышленности, учеными, инженерами и научно-технической общественностью в связи с созданием ЕЭС страны. Журнал публикует такие статьи, как «Разъединитель на 400 кВ для электропередачи Куйбышев—Москва», «Конструкции выключателей на 380...400 кВ», «Трубчатые разрядники РТВ», «Повышение износустойчивости контактов пускателей» (№ 1, 2, 3, 5, 1956 г.).

Статьи «Управляемые разрядники», «Разрядники с 100%-ной восстанавливающей прочностью» (№ 1, 1962 г.) представляли большой интерес для создания и эксплуатации ЕЭС страны, поэтому, как и другие публикации на эту тему, были встречены читателями с большим интересом.

Внимание к новым устройствам, содержащим элегаз, получило свое отражение в статье «Некоторые закономерности поверхностного разряда в элегазе» (№ 12, 1967 г.) и ряде других публикаций. Статья «Электрические характеристики изоляции мощных высоковольтных трансформаторов при воздействии типа коммутационных перенапряжений» (№ 1, 1968 г.) представила значительный интерес в разрезе возникающих при проектировании и эксплуатации энергосистем вопросов. Опыт эксплуатации различных электротехнических установок получил свое отражение в таких публикациях, как «Электромагнитные выключатели и опыт их эксплуатации», «Частичные разряды в изоляции высоковольтных трансформаторов», «Контроль изоляции под рабочим напряжением» (№ 3 и 4, 1971 г.).

Статьи «Влияние режима сушки на диэлектрические свойства и внутреннюю поверхность целлюлозных волокон электрокартона» (№ 6, 1973 г.), «Переходные режимы работы каскадного трансформатора тока с дополнительной ступенью» (№ 2, 1973 г.) и «Экспериментальное исследование влияния ввода на электрическую прочность внешней изоляции трансформаторов» (№ 8, 1973 г.) также отражали проблемы исследований работы аппаратов в электрических системах.

Вопросам электропривода журнал уделял особое внимание. В 1967 г. публикуется статья «Основные этапы развития автоматизированного привода в СССР» (№ 11, 1967 г.). Далее вопросы привода освещаются в общих статьях, как например, «Развитие автоматизированного привода в Х пятилетке» (№ 5, 1976 г.) и конкретных, рассматривающих отдельные направления развития проблемы.

Ряд статей в журнале был посвящен электрическим сетям и электроснабжающим системам сельского хозяйства. Итогам развития сельской электрификации СССР посвящается большая статья в № 8, 1967 г., а также статьи в № 5, 1969 г.; № 12, 1970; № 4, 1971; № 10, 1977; № 11, 1978. В этих и других статьях отмечается, что современный этап электрификации сельского хозяйства Советского Союза характеризуется завершением электроснабжения всех производственных потребителей и практических всех жилых домов в сельских

населенных пунктах. В статьях указывается, что уже к 1971 г. около 95% всего объема электроэнергии из 44 млрд. кВт·ч сельское хозяйство получило от районных энергетических систем. К этому времени в сельском хозяйстве сооружено более 3 млн. км электрических воздушных линий, в том числе напряжением 0,38 кВ—1,86 млн. км и 6—20 кВ (главным образом 10 кВ) — 1,3 млн. км. Количество трансформаторных пунктов 6—20/0,38 кВ превысило 500 тыс. единиц. Однако отмечалось, что наличие столь протяженных воздушных линий создавало и создает серьезные затруднения для сельского хозяйства, а организация электроснабжения вызывает справедливые нарекания сельских потребителей. В связи с этим журнал как весьма актуальную проблему поднял дискуссионный вопрос о коренной реконструкции сельских воздушных линий путем постепенной их замены кабельными подземными линиями.

Основные преимущества кабельных подземных линий в сельском хозяйстве, как отмечается в статьях, следующие:

1. Создается возможность прокладывать линии по кратчайшим расстояниям, а не по обочинам полей севооборота, как это требуется для воздушных линий.

2. Срок службы линий повышается примерно в два раза, а эксплуатационные издержки сократятся на 25—35%. Полностью исключается потребность в лесоматериалах, цементе и металлической арматуре.

3. Создается возможность для высокой степени механизации прокладки линий с минимальными затратами ручного труда.

4. Повреждения воздушных линий, создающие 35—40% длительности аварийных отключений, вызываются обрывами и схлестыванием проводов, выбросами и разрушениями опор. При кабельных линиях они исключаются полностью. Продолжительность отключений из-за повреждений изоляции сократится примерно в два раза, а сейчас она составляет 45—50% общей длительности аварийных отключений.

Общий недоступ к электроэнергии из-за отключений сократится примерно в три раза, и потому годовой ущерб от перерывов электроснабжения составит только одну треть ущерба, который имеет место при воздушных линиях. Таким образом будет кардинально решена задача обеспечения высокой надежности электроснабжения, которая в настоящее время является чрезвычайно важной, особенно в связи с массовым строительством крупных комплексов по производству сельскохозяйственной продукции на промышленной основе. В обзорах и сообщениях, публикуемых журналом, отмечается, что в развитых в техническом отношении зарубежных странах строительство сельских кабельных сетей приняло широкий размах.

Материалы опубликованных статей показывают, что даже применяя стандартные кабели в масштабах существующих сельских линий Советского Союза при практически одинаковых приведенных затратах, можно получить большую экономию за счет снижения эксплуатационных издержек и сокращения ущерба от перерывов электроснабжения.

Разумеется, настоящий обзор не мог быть полным и даже не коснулся ряда тем, рассматривавшихся в журнале. Он был нацелен на отражение главной генеральной линии энергетики — создания ЕЭС страны. Подводя итоги сказанному о деятельности журнала «Электричество» в период 1956—

1979 гг., можно отметить, что все это время он находился на переднем фронте борьбы за решение задач, поставленных партией и правительством перед советскими энергетиками, оказывал существенное влияние на техническую политику в области электротехники и энергетики.



УДК 621.315.1:621.317.312

## Измерение токов линий высшего напряжения по их магнитным полям

МЕЕРОВИЧ Э. А., доктор техн. наук, НАЗАРОВ Л. А., канд. техн. наук,

КАРАБАЕВ Г. Х., КОКУРКИН Б. П., инженеры

ЭНИН им. Г. М. Кржижановского

Вследствие недостаточной чувствительности релейных защит ВЛ сверхвысокого напряжения, реагирующих на токи промышленной частоты, в нашей стране и за рубежом разрабатываются релейные защиты, реагирующие на волновые переходные процессы [Л. 1 и 2]. Эти защиты обладают высокой чувствительностью и быстродействием, практически не зависящими от предшествующих режимов (токов нагрузки). Для работы этих защит необходимо, чтобы токоизмерительные устройства точно воспроизводили форму измеряемого тока при волновых процессах. В частности, частотная полоса пропускания токоизмерительного устройства для запуска указанных защит должна быть в пределах от 20 Гц до 20 кГц. Современные измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения не удовлетворяют этим требованиям, так как конструктивно выполняются многокаскадными, что приводит к повышению погрешности [Л. 3 и 18].

В связи с вышеуказанным целесообразна разработка токоизмерительных устройств, работа которых основана на иных, нежели у трансформаторов тока, физических законах и обладающих по сравнению с последними более высокими технико-экономическими показателями [Л. 4 и 5]. Новые токоизмерительные устройства различаются по принципу передачи информации с высоковольтного провода на землю [Л. 3—6]. Наиболее просто токи ВЛ СВН могут быть измерены по их магнитным полям.

В секторе сильных электромагнитных полей Энергетического института им. Г. М. Кржижановского предложен безынерционный дистанционный измеритель токов ВЛ. В качестве магниточувствительного элемента (МЭ) в этих устройствах используются гальвано-магнитные полупроводниковые преобразователи Холла с концентраторами магнитного поля. Они обладают следующими достоинствами: точно воспроизводят форму тока в широком частотном диапазоне; практически безынерционны; допускают повышение помехоустойчивости, в частности, путем модулирования выходного сигнала током питания преобразователей Холла заданной частоты; позволяют проводить исследования с потен-

циала земли волновых процессов в ВЛ и таким образом исследовать волновые характеристики последних.

В течение ряда лет подобные устройства испытывались на ВЛ 500 и 750 кВ. Испытания показали их работоспособность, помехоустойчивость, возможность практического применения для релейной защиты и автоматики энергосистем и других задач электроэнергетики.

**Измерение токов ВЛ СВН наименьшим количеством МЭ.** Основная трудность, возникающая при измерении токов ВЛ по их магнитному полю, заключается в том, что МЭ, произвольно размещенный под проводами ВЛ, реагирует на магнитное поле токов всех проводов линии. При измерении тока в одном из проводов необходимо исключить влияние токов в других проводах, что приводит к увеличению числа МЭ. Так, в [Л. 7] приведен способ дистанционного измерения токов трехпроводной линии с помощью девяти МЭ (индукционных катушек). Авторами настоящей статьи ранее была испытана схема измерения каждого из фазных токов трехпроводной линии с помощью двух МЭ. Идея предложения заключается в том, что МЭ образуют решающую схему, напряжение на выходе которой пропорционально измеряемому току.

Ниже показан принцип образования таких схем с использованием МЭ на основе гальвано-магнитных преобразователей Холла при следующих допущениях: принимается, что провода расположены в плоскости, параллельной поверхности земли, а магнитное поле ВЛ считается плоскопараллельным; не учитывается искажение топологии магнитного поля от ферромагнитных сред (например, порталов); магниточувствительные элементы считаются точечными, реагирующими на нормальную к пластинам преобразователей Холла составляющую индукции магнитного поля; расщепленные фазы заменяются одним проводом, размещенным в геометрическом центре многоугольников, образованных проводами данной фазы.

В дальнейшем будем линии считать трехпроводными. Однако предлагаемый подход к решению

поставленной задачи остается верным и для многопроводной линии с проводами, не лежащими в одной плоскости.

Мгновенное значение выходного сигнала МЭ  $e_x$ , размещенного под проводами ВЛ, пропорционально току питания преобразователей Холла и нормальной к пластинам преобразователей Холла составляющей индукции магнитного поля. Оно характеризуется коэффициентом чувствительности магниточувствительного элемента  $\gamma$ . Для линейной среды справедливо:

$$\vec{H} = \sum_1^3 \vec{H}_s, \quad (1)$$

где  $\vec{H}$  — вектор напряженности магнитного поля в некоторой точке пространства;  $\vec{H}_s$  — вектор напряженности магнитного поля, возбуждаемый током в  $s$ -м проводе, или

$$\vec{H}_s = \sum_1^3 \vec{H}_{sn};$$

$$H_{sn} = \frac{i_s}{2\pi r_s} \sin(\vec{r}_s \cdot \vec{n}),$$

где  $\vec{H}_{sn}$  — нормальная составляющая вектора напряженности магнитного поля к поверхности преобразователя Холла, возбуждаемая током  $i_s$  в точке наблюдения;  $\vec{r}_s$  — радиус-вектор, проведенный из точки размещения МЭ к  $s$ -му проводу;  $\vec{n}$  — единичный вектор положительной нормали к поверхности преобразователя Холла.

Тогда

$$e_x = \gamma H_n = \frac{\gamma}{2\pi} \sum_1^3 \frac{i_s}{r_s} \sin(\vec{r}_s \cdot \vec{n}). \quad (2)$$

Выражение (2) имеет три неизвестных, поскольку размещение МЭ и их ориентация известны, а э. д. с. Холла поддается измерению. Размещая три МЭ соответствующим образом относительно проводов трехпроводной ВЛ, всегда можно добиться, чтобы система из трех выражений, аналогичных (2), рассматриваемая как система трех уравнений относительно токов  $i_s$ , имела решение, т. е. получить систему независимых друг от друга уравнений. Таким образом, с помощью вычислительного устройства можно выделить сигналы, пропорциональные мгновенным значениям токов и их любых линейных комбинаций. Однако этого можно добиться и схемным способом, образуя решающую схему путем соответствующего соединения между собой выходных зажимов преобразователей Холла и подходящего выбора их чувствительности.

Рассмотрим два МЭ, для которых справедливо следующее:

$$\left. \begin{aligned} e_{xm} &= \gamma_m (\beta_{1m} \cdot i_1 + \beta_{2m} \cdot i_2 + \beta_{3m} \cdot i_3) = \gamma_m \sum_1^3 i_s \cdot \beta_{sm}; \\ e_{xn} &= \gamma_n (\beta_{1n} \cdot i_1 + \beta_{2n} \cdot i_2 + \beta_{3n} \cdot i_3) = \gamma_n \sum_1^3 i_s \cdot \beta_{sn}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\beta_{sm}$  и  $\beta_{sn}$  — коэффициенты, определяемые размещением и ориентацией  $m$ -го и  $n$ -го МЭ относительно  $s$ -го провода. Пусть  $\gamma_m/\gamma_n = \varepsilon$ . Тогда, включая выходы обоих МЭ по схеме суммирования [Л. 8], получим выходной сигнал

$$e_{xm} + e_{xn} = \gamma_n [(\beta_{1n} + \varepsilon \beta_{1m}) i_1 + (\beta_{2n} + \varepsilon \beta_{2m}) i_2 + (\beta_{3n} + \varepsilon \beta_{3m}) i_3]. \quad (4)$$

Если МЭ расположить в пространстве так, чтобы коэффициенты при токах в выражении (4) принимали нужные значения, то можно получить на выходе схемы сигналы, пропорциональные мгновенному значению какого-либо из токов, либо их линейным комбинациям. Так, для выделения сигнала, пропорционального  $i_1$ , необходимо, чтобы

$$\beta_{2n} + \varepsilon \beta_{2m} = \beta_{3n} + \varepsilon \beta_{3m} = 0,$$

а для получения на выходе сигнала, пропорционального алгебраической сумме фазных токов,

$$\beta_{1n} + \varepsilon \beta_{1m} = \beta_{2n} + \varepsilon \beta_{2m} = \beta_{3n} + \varepsilon \beta_{3m}.$$

При этом получаются системы уравнений с семью (координаты МЭ, их ориентация, соотношение чувствительностей) неизвестными и, следовательно, такие системы обладают бесконечно большим количеством решений. Чтобы получить требуемые решения, примем дополнительные условия: необходимость размещения МЭ на безопасном расстоянии от высоковольтных проводов, получение на выходе достаточного сигнала, сведение к минимуму влияния тока других фаз, наложенные связи между токами, а также требование уменьшения влияния факторов, обуславливающих погрешность измерения. Ниже рассматриваются конкретные примеры пространственного расположения преобразователей Холла при измерении токов и их линейных комбинаций и показаны способы уменьшения необходимого для этих целей количества МЭ.

Измерение алгебраической суммы мгновенных значений фазных токов ВЛ. Для измерения алгебраической суммы токов (токов нулевой последовательности) достаточно двух МЭ, размещенных под проводами таким образом, чтобы коэффициент передачи тока устройства по отношению к токам двух фаз был одинаков.

На рис. 1 показаны два МЭ ( $m$  и  $n$ ), произвольно размещенные под проводами ВЛ ( $\vec{H}_n$ ,  $\vec{H}_m$  — единичные векторы положительных нормалей к пластинам преобразователей Холла соответствующих МЭ). Здесь и далее для удобства будем за единицу линейного размера считать  $D$  — междуфазное расстояние. Пусть МЭ обладают одинаковой чувствительностью ( $\varepsilon=1$ ). Если их выходы включить согласно, то, как следует из (4), для измерения токов нулевой последовательности необходимо принять

$$\beta_{1n} + \beta_{1m} = \beta_{2n} + \beta_{2m} = \beta_{3n} + \beta_{3m}. \quad (5)$$

При произвольном размещении МЭ коэффициенты  $\beta_{sj}$  ( $s=1, 2, 3$ ;  $j=m, n$ ) имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \beta_{1j} &= -\frac{1}{2\pi D} \frac{(x_j + 1) \sin \alpha_j - y_j \cos \alpha_j}{y_j^2 + (x_j + 1)^2}; \\ \beta_{2j} &= -\frac{1}{2\pi D} \frac{x_j \sin \alpha_j - y_j \cos \alpha_j}{x_j^2 + y_j^2}; \\ \beta_{3j} &= \frac{1}{2\pi D} \frac{(x_j - 1) \sin \alpha_j + y_j \cos \alpha_j}{y_j^2 + (x_j + 1)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

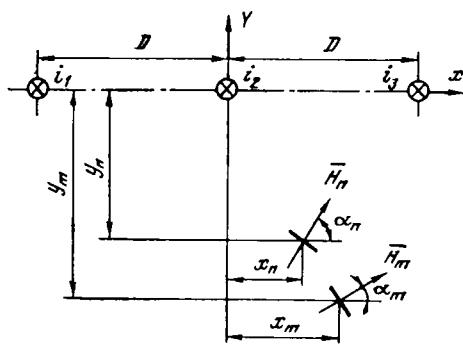


Рис. 1.

После подстановки найдем:

$$\left. \begin{aligned} y_n = y_m = -y; \\ -x_n = x_m = x; \\ -\alpha_m = \alpha_n = \alpha; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$3yx^2 - y^2 - \operatorname{tg} \alpha (x^2 - 3xy^2 - x) = 0. \quad (8)$$

Полученное решение соответствует расположению МЭ, изображенном на рис. 2. При расположении МЭ в соответствии с (7) и (8) их суммарный сигнал

$$e_{0\Sigma} = \frac{\gamma}{2\pi D} \frac{x \operatorname{tg} \alpha - y}{x^2 + y^2} \frac{2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} (i_1 + i_2 + i_3) = \gamma \beta_{0\Sigma} (i_1 + i_2 + i_3), \quad (9)$$

где  $\beta_{0\Sigma}$  — коэффициент передачи устройства по отношению к суммарному току. Уравнения (7) и (8) имеют бесчисленное множество решений. При  $\alpha = 0$  получаем:

$$y = \sqrt{3x^2 - 1};$$

$$e_{0\Sigma} = -\frac{\gamma}{2\pi D} \frac{\sqrt{3x^2 - 1}}{4x^2 - 1} (i_1 + i_2 + i_3).$$

Условие получения максимального выходного сигнала дает

$$\frac{\partial e_{0\Sigma}}{\partial x} = \frac{\partial \beta_{0\Sigma}}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

Решая (10), находим:

$$x = \sqrt{\frac{5}{12}}; \quad y = 0,5.$$

**Измерение фазного тока.** Рассмотрим два МЭ (см. рис. 1). В соответствии с (4), для того чтобы суммарный сигнал от обоих МЭ был пропорционален одному из фазных токов (например  $i_1$ ), необходимо выполнение условий:

$$\left. \begin{aligned} \beta_{2n} + \epsilon \beta_{2m} = 0; \\ \beta_{1n} + \epsilon \beta_{1m} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Подставляя в (11) значения  $\beta_{sj}$  из (6), получаем:

$$\left. \begin{aligned} x_n \sin \alpha_n - y_n \cos \alpha_n - \epsilon \frac{x_m \sin \alpha_m - y_m \cos \alpha_m}{x_m^2 + y_m^2} = 0; \\ \frac{(1 - x_n) \sin \alpha_n + y_n \cos \alpha_n}{(1 - x_n)^2 + y_n^2} - \epsilon \frac{(1 - x_m) \sin \alpha_m + y_m \cos \alpha_m}{(1 - x_m)^2 + y_m^2} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В системе уравнений (12) семь неизвестных. Если принять  $x_m = 0$ ;  $\alpha_m = \alpha_n = 0$ ;  $y_n = y_m = 0$ ;  $x_n = -1$ , получим:  $\epsilon = 1/3$ ;  $y = -1/\sqrt{2}$ . Аналогичным образом может быть найден любой из фазных токов.

**Измерение алгебраических разностей мгновенных значений фазных токов.** Некоторые виды релейных защит реагируют на разности мгновенных значений фазных токов контролируемой линии. Для их измерения достаточно трех МЭ. Предположим, что два МЭ ( $m$  и  $n$ ), обладающие одинаковой чувствительностью, позволяют измерять разность токов крайней и средней фаз  $i_1 - i_2$ .

Тогда, в соответствии с (4), их координаты должны удовлетворять условиям:

$$\left. \begin{aligned} \beta_{2n} + \beta_{1n} = 0; \\ \beta_{1m} + \beta_{2m} = -(\beta_{2n} + \beta_{2m}). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Записав условие (13) с учетом (6), получим, что при включении МЭ согласно сигнал на их выходе

$$e_n + e_m = \gamma (\beta_{1n} + \beta_{1m}) (i_1 - i_2). \quad (14)$$

Третий магниточувствительный элемент  $p$  размещается непосредственно под средней фазой, причем положительная нормаль к пластинам его преобразователей Холла направлена строго на провод средней фазы. На выходе этого МЭ при данном положительном направлении фазных токов сигнал  $e_p = \gamma_p \beta_p (i_3 - i_1)$ . Для измерения разностей фазных токов необходимо выполнить условие

$$\gamma_p \beta_p = (\beta_{1n} + \beta_{1m}) \gamma, \quad (15)$$

а выходы МЭ соединить по схеме, приведенной на рис. 3 (стрелками обозначены положительные направления э. д. с. Холла магниточувствительных элементов  $p$ ,  $n$  и  $m$ ).

Тогда

$$\begin{aligned} u_{12} &= e_p = \gamma_p \beta_p (i_3 - i_1); \\ u_{23} &= e_n + e_m = \gamma_p \beta_p (i_1 - i_2); \\ u_{13} &= e_n + e_m - e_p = \gamma_p \beta_p (i_2 - i_3). \end{aligned}$$

Подставляя (6) в (15), получим:

$$\begin{aligned} \frac{-y_p}{1 + y_p^2} &= \frac{y_m \cos \alpha_m - (x_m + 1) \sin \alpha_m}{y_m^2 + (1 + x_m)^2} - \\ &- \frac{(1 - x_n) \sin \alpha_n + y_n \cos \alpha_n}{y_n^2 + (1 - x_n)^2}, \end{aligned}$$

где  $\epsilon = \gamma_p / \gamma$ .

В частности, при  $-x_n = x_m = 0,5$ ;  $y_p = y_n = y_m = -0,5$ , получаем:  $\alpha_n = -89^\circ$ ;  $\alpha_m = 110^\circ 45'$ ;  $\epsilon = 0,67$ .

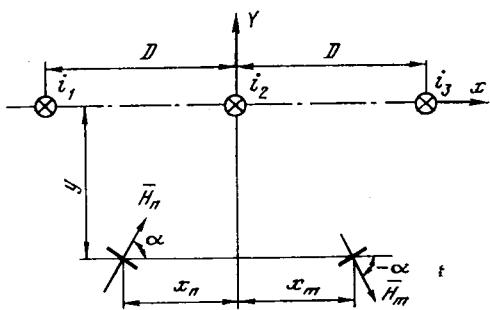


Рис. 2.

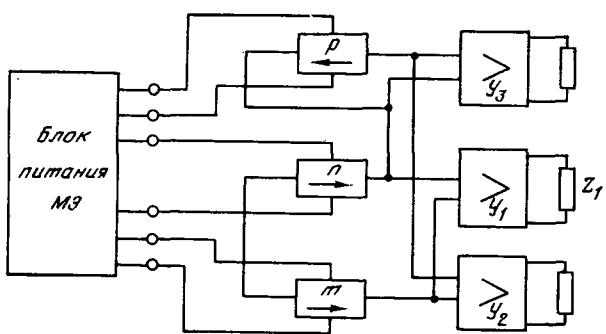


Рис. 3.

**Измерение токов обратной последовательности ВЛ.** Ток обратной последовательности ВЛ в установившемся режиме определяется следующим выражением:

$$I_{\text{обр}} = I_A - 0,5(I_B + I_C) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(I_C - I_B),$$

где  $I_{\text{обр}}$  — вектор тока обратной последовательности ВЛ;  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  — фазные токи.

Выходной сигнал устройства, измеряющего ток обратной последовательности,

$$u_2 = I_{\text{обр}} K, \quad (16)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности.

Пусть

$$u_2 = \dot{u}_x + \dot{u}_K,$$

где

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_x &= K [I_A - 0,5(I_B + I_C)]; \\ \dot{u}_K &= K j (I_C - I_B) \frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Следовательно, необходимо получить две линейные комбинации фазных токов, сдвинутые на  $90^\circ$  относительно друг друга. На выходе двух МЭ, обладающих одинаковой чувствительностью и включенных согласно, сигнал будет соответствовать (17), если их размещение будет удовлетворять следующим условиям:

$$\left. \begin{aligned} \beta_{Bn} + \beta_{Bm} &= \beta_{Cn} + \beta_{Cm}; \\ 2(\beta_{Bn} + \beta_{Bm}) &= -(\beta_{An} + \beta_{Am}). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

После подстановки значений  $\beta_{sj}$  из (6) в (18) находим

$$\left. \begin{aligned} -y &= y_n = y_m; \\ \alpha &= \alpha_n = -\alpha_m; \\ x &= x_m = -x_n; \\ \operatorname{tg} \alpha &= \frac{(3y^4 + 3x^4 + 6y^2x^2 + 4y^2 + 1)y}{(3y^4 + 3x^4 + 6y^2x^2 - 4x^2 + 1)x}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

При размещении МЭ в соответствии с (19) их суммарный сигнал

$$e_m + e_n = \frac{\beta'_{\text{обр}} Y}{2\pi D} [I_A - 0,5(I_B + I_C)],$$

где

$$\beta'_{\text{обр}} = \frac{x \operatorname{tg} \alpha - y}{x^2 + y^2} \frac{2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}.$$

В установившемся режиме для получения сигнала согласно (16) в данное устройство включаются две преобразовательные катушки, размещенные в тех же точках, что и МЭ, так, чтобы оси катушек совпадали с нормалями к пластинам соответствующих преобразователей Холла. Если соединить зажимы катушек встречно, а их чувствительности установить в  $\sqrt{3}$  больше чем у МЭ, то сигнал на их выходе

$$e_K = \frac{\gamma_X \beta'_{\text{обр}} Y}{2\pi D} \frac{\sqrt{3}}{\omega_0} \frac{d(i_C - i_B)}{dt}.$$

Суммируя выходные сигналы от МЭ и от преобразовательных катушек, получим:

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= e_x + e_K = \frac{\gamma_X \beta'_{\text{обр}} Y}{2\pi D} \left[ i_A - 0,5(i_B - i_C) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{2\omega_0} \frac{d(i_C - i_B)}{dt} \right]. \end{aligned} \right.$$

Отсюда следует, что в установившемся режиме на выходе устройства получается сигнал, пропорциональный току обратной последовательности ВЛ.

**Конструкция магниточувствительных элементов и погрешность измерения.** Конструкция МЭ определяется его назначением. Так, современные релейные защиты ВЛ СВН требуют достаточно точного воспроизведения формы и фазы кривой тока защищаемой линии как в установившемся, так и в переходном режимах ВЛ и малой инерционности токоизмерительных устройств. Погрешность измерения не должна превышать определенного значения (например, 10% в установившемся режиме) в широком диапазоне изменения токов ВЛ. С ростом номинальных напряжений ВЛ резко увеличиваются междуфазные расстояния. В соответствии с [Л. 9] расстояние от МЭ до высоковольтного провода не должно быть меньше половины междуфазного расстояния. При этом напряженность электрического поля в местах размещения МЭ достигает нескольких десятков киловольт на метр [Л. 10]. Напряженность магнитного поля в зависимости от тока ВЛ может изменяться в пределах от 0,6 до 180 А/м. Температура окружающей МЭ среды может колебаться в пределах от  $-50$  до  $+50^\circ\text{C}$ .

Таким образом, конструкция МЭ должна удовлетворять следующим требованиям: практическая безынерционная и точная передача формы и фазы кривой измеряемого поля; линейность выходного сигнала в широком диапазоне изменения измеряемых токов; исключение электростатических наводок на выходных цепях; максимальная чувствительность; удовлетворительная температурная погрешность.

Из вышеуказанного следует, что определение токов ВЛ по возбужденному ими магнитному полю требует измерения слабых магнитных полей. Чувствительность существующих преобразователей Холла лежит в пределах от 5 до 50 мкВ $\cdot$ м/А $^2$ ; следовательно, их выходной сигнал в магнитных полях указанной величины не превышает нескольких десятков микровольт. Передача столь слабых сигналов в условиях распределительных устройств электрических станций и подстанций представляет

значительную трудность. Для усиления сигналов можно было бы использовать электронные усилители. Однако последние из-за необходимости устранения собственных шумов, возникающих при усилении слабых входных сигналов, получаются достаточно сложными. Авторы применили для увеличения отношения входного сигнала к шуму ферритовые концентраторы поля, выполненные в виде цилиндрических стержней с зазорами, перпендикулярными его оси, в которых размещаются преобразователи Холла, соединенные между собой по схеме суммирования. Это позволяет примерно на два порядка усилить входной сигнал и не создает дополнительных шумов в диапазоне измеряемой величины [Л. 11]. Такая конструкция концентратора обеспечивает измерение проекции вектора индукции магнитного поля на ось концентратора.

Ферритовый концентратор улучшает теплоотвод от преобразователей Холла, увеличивая мощность, рассеиваемую на их поверхностях, что позволяет повысить ток питания используемых преобразователей Холла, а, следовательно, и их чувствительность. Время установления поля в зазорах концентратора из-за большого удельного сопротивления ферритов составляет  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  с. Для применяемых в качестве концентраторов поля ферритов Н-400 критическая частота  $f_{\text{кр}}$ , при которой тангенс угла потерь достигает 0,02, а действительная часть комплексной магнитной проницаемости не зависит от частоты, равна 200 кГц [Л. 12]. Преобразователи Холла практически безынерционны, и МЭ, состоящий из цилиндрического ферритового концентратора с зазорами, в которых размещены преобразователи Холла, позволяет точно передавать форму и фазу кривой измеряемого однородного поля, содержащего спектр частот от 0 до 200 кГц [Л. 8]. В силу того, что расстояние от МЭ до ближайшего из высоковольтных проводов более чем на порядок превышает линейные размеры используемых нами концентраторов поля (80 см), степень неоднородности магнитного поля в месте размещения МЭ не превышает 0,1 %.

Экспериментально установлено, что концентратор, состоящий из 5 соосно расположенных ферритовых стержней (марки Н-400) длиной по 160 мм, диаметром 8 мм и зазорами между стержнями, равными 0,43 мм, начинает насыщаться в однородном магнитном поле при напряженности  $H = 280$  А/м, что обеспечивает линейность выходного сигнала МЭ в требуемом диапазоне изменения измеряемой величины.

Для исключения электрических наводок на выходных цепях МЭ, концентратор помещается в кожух, экранированный латунной фольгой и находящийся под потенциалом земли. Питание преобразователей Холла и передача выходного сигнала осуществляется через экранированный кабель, подключаемый к МЭ с помощью радиоразъема. Используемые преобразователи Холла имеют низкое (порядка нескольких Ом) выходное сопротивление, что также способствует снижению наводок на выходных цепях МЭ.

**Влияние дополнительных факторов на погрешность устройств дистанционного измерения токов ВЛ.** Погрешность при дистанционном измерении то-

ков обуславливается, помимо указанных выше, следующими причинами: смещением проводов и изменением их стрелы провеса под действием силы ветра и изменения температуры окружающей среды; изменением магнитной проницаемости концентраторов поля МЭ и постоянной Холла гальванических преобразователей вследствие изменения температуры окружающей среды; влиянием токов в земле, а также токов соседних ВЛ.

Приведем оценку каждой из перечисленных погрешностей и покажем способы их уменьшения. В качестве примера рассмотрим измерение токов нулевой последовательности ВЛ 500 кВ. При размещении МЭ в 50 метрах от опоры (длина пролета 430 м) и допустимой скорости ветра 25 м/с коэффициент, характеризующий погрешность,  $K_p = e_n/e_0 = 7,4\%$ , где  $e_n$  — выходной сигнал устройства при протекании в линии только токов прямой и обратной последовательностей и при смещении проводов;  $e_0$  — выходной сигнал при отсутствии смещения проводов и при протекании по линии только токов нулевой последовательности.

При изменении температуры на 20°C (длина пролета 250 м)  $K_p = 0,8\%$ .

Суммарная э. д. с. преобразователей Холла, размещенных в зазорах ферритового концентратора, определяется следующим выражением:

$$e_x = \beta_0 K_y R_x i_y n, \quad (20)$$

где  $R_x$  — постоянная Холла;  $n$  — количество преобразователей Холла;  $i_y$  — ток управления (питания) преобразователей Холла.

Продифференцировав (20) по температуре  $t$ , получим

$$\frac{de_x}{dt} = \beta_0 i_y n \left( R_x \frac{dK_y}{dt} + K_y \frac{dR_x}{dt} \right), \quad (21)$$

откуда следует, что величина выходного сигнала не зависит от температуры окружающей среды при условии

$$\frac{dR_x}{dt} / \frac{dK_y}{dt} = -\frac{R_x}{K_y}.$$

Для коэффициента усиления концентратора  $K_y$  справедливо:

$$\frac{dK_y}{dt} = \frac{\partial K_y}{\partial \mu} \frac{d\mu}{dt}. \quad (22)$$

Как будет показано ниже,  $K_y$  может быть определен из следующего выражения:

$$K_y = \frac{\mu \cdot 0,745 (l_c + \delta_3)}{0,745 \delta_3 \mu + l_c (1 + 0,765 N_{3,3} \mu)}.$$

Подставляя  $K_y$  в (22), находим

$$\frac{dK_y}{dt} = \frac{(l_c + \delta_3) 0,745}{[0,745 \delta_3 \mu + l_c (1 + 0,765 N_{3,3} \mu)]^2} \frac{d\mu}{dt}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} -\frac{1}{R_x} \frac{dR_x}{dt} &= \frac{1}{K_y} \frac{dK_y}{dt} = \\ &= \frac{l_c}{\mu [0,745 \delta_3 \mu + l_c (1 + 0,765 N_{3,3} \mu)]} \frac{d\mu}{dt}. \end{aligned}$$

Обозначив

$$\frac{1}{R_X} \frac{dR_X}{dt} = \sigma_X;$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dt} = \sigma_\mu,$$

получим следующую запись условия минимизации температурной погрешности

$$\frac{\sigma_X}{\sigma_\mu} = - \frac{1}{1 + \mu \left( 0,765N_{3,3} + \frac{0,745\delta_3}{l_c} \right)}. \quad (23)$$

Из (23) следует, что необходимым условием отсутствия зависимости выходного сигнала МЭ от температуры будет выполнение неравенства  $|\sigma_X| < |\sigma_\mu|$ .

Используемые преобразователи Холла из арсенида индия имеют средний температурный коэффициент постоянной Холла  $\sigma_X = 0,15\%/\text{град}$ , а температурный коэффициент магнитной проницаемости используемых ферритов  $\sigma_\mu = 0,27\%/\text{град}$ . Температурную погрешность можно снизить также, положив в основу работы МЭ (на гальваномагнитных преобразователях Холла с использованием ферритовых концентратов поля) компенсационный способ измерения.

Рассмотрим погрешность от токов в земле для однопроводной ВЛ. Поверхность земли считается плоской, а сама земля — однородной. Тогда для установившегося режима горизонтальная и вертикальная составляющие вектора магнитного поля, возбуждаемого током земли в некоторой точке пространства над ее поверхностью, могут быть определены из следующих приближенных выражений [Л. 14]:

$$\left. \begin{aligned} H_{x3n} &= \frac{I}{2\pi} \left[ \frac{\alpha}{3} V \bar{j} \alpha + \frac{j\alpha}{8} \left( \eta \ln \frac{z}{2} + \eta_1 \ln \frac{z_1}{2} \right) \right]; \\ H_{y3n} &= -\frac{I}{2\pi j} \left[ \frac{j\alpha}{8} \left( \eta \ln \frac{z}{2} - \eta_1 \ln \frac{z_1}{2} \right) - \right. \\ &\quad \left. - 2,16 \cdot 10^{-2} j \alpha (\eta - \eta_1) + \left( \frac{j\alpha}{15} \right)^{1,5} (\eta^2 - \eta_1^2) \right], \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где  $\alpha = \lambda \mu_0 \omega$ ;  $\eta = h + y - jx$ ;  $\eta_1 = h + y + jx$ ;  $\omega$  — круговая частота;  $\lambda$  — удельная проводимость земли;  $z = \eta V \bar{j} \alpha$ ;  $z_1 = \eta_1 V \bar{j} \alpha$ ;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха;  $I$  — ток провода;  $h$  — высота подвеса провода;  $x, y$  — координаты точки наблюдения.

При расстоянии до поверхности земли менее 100 м, частоте  $f = 50$  Гц,  $|z| \leq 0,2$  и  $\lambda \leq 10 \text{ л/}(\text{Ом} \cdot \text{м})$  напряженность магнитного поля от токов в земле может быть подсчитана по (24) с погрешностью не более 2,3%. Используя метод наложения, легко получить соответствующие формулы для трехпроводной линии. Напряжение на выходе МЭ, расположенного в некоторой точке пространства над поверхностью земли,

$$u = K(\vec{H}_{np3} + \vec{H}_{33}),$$

где  $\vec{H}_{np3}$  и  $\vec{H}_{33}$  — проекции напряженности магнитного поля измеряемого тока и тока в земле на на-

правление нормали к пластинам преобразователей Холла.

$$\vec{H}_{np3} = \frac{I}{2\pi} \left[ \frac{(h-y) \cos \beta + x \sin \beta}{x^2 + (h-y)^2} \right] = |\vec{H}_{np3}| e^{j\theta_1};$$

$$\vec{H}_{33} = \vec{H}_{x3} \cos \beta + \vec{H}_{y3} \sin \beta = |\vec{H}_{33}| e^{j\theta_2}.$$

Легко видеть, что абсолютная погрешность

$$\delta = \frac{|\vec{H}_{np3} + \vec{H}_{33}| - |\vec{H}_{np3}|}{|\vec{H}_{np3}|} 100\%_0 =$$

$$= \frac{|\vec{H}_{np3}| (1 - \cos \varphi) + \vec{H}_{33} \cos (\theta_1 - \theta_2)}{|\vec{H}_{np3}| \cos \varphi} \frac{1}{100},$$

а угловая погрешность

$$\varphi = \arctg \frac{|\vec{H}_{np3} + \vec{H}_{33}| \cdot |\vec{H}_{np3}|}{|\vec{H}_{np3}| + |\vec{H}_{33}| \cos (\theta_2 - \theta_1)}.$$

Так, для низких частот  $\lambda \leq 10^{-2} \text{ л/}(\text{Ом} \cdot \text{м})$ ,  $0 \leq x \leq 18 \text{ м}$ ,  $0 \leq y \leq 16 \text{ м}$ , абсолютная погрешность  $\delta\%_0 = 4,5$ , а угловая погрешность  $\varphi = 47^\circ$ .

Рассмотрим влияние токов соседних ВЛ на погрешность измерений. Пусть ток одной из фаз  $n$ -проводной линии определяется с помощью  $k$  магниточувствительных элементов. Суммарный сигнал всех МЭ в общем случае

$$e_\Sigma = \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^k i_s \beta_{sj} \gamma_j.$$

Для того чтобы измерить  $s$ -й ток (положим  $s = 1$ ), необходимо выполнить условие

$$\sum_{j=2}^k \gamma_j \beta_{sj} = -\gamma_1 \beta_{s1}, \quad (25)$$

где  $s = 2, 3, \dots, n$ ;  $\beta_{sj} = f_s(x_j, \alpha_j, \gamma_j)$ .

Задача заключается в том, чтобы определить необходимое количество МЭ и их координаты. Если  $n = k$  и координаты МЭ фиксированы, то выражение (25) есть система линейных уравнений. Если определитель такой системы не равен нулю, то чувствительности МЭ из (25) определяются однозначно. Таким образом, общие принципы измерения токов в  $n$ -проводной линии такие же, как и в случае трехпроводной ВЛ, причем количество МЭ, необходимых для измерения токов одной фазы, не превышает  $n$ . На практике необходимо учитывать только те линии, токи которых могут возбудить существенное поле помехи в местах размещения МЭ.

Обычно главная схема подстанции выбирается таким образом, что оборудование разного напряжения размещается на разных участках подстанции. Следовательно, эксплуатационное напряжение влияющих ВЛ должно быть такое же, как и у контролируемой. Кроме того, ВЛ СВН используются для передачи мощности от одной энергосистемы в другую, либо от крупной электростанции в энергосистему. Поэтому короткое замыкание в одной из ВЛ вызывает токи короткого замыкания в дру-

гих линиях. Вследствие этого отношение максимального тока влияющей линии к минимальному току, протекающему, в это же время в контролируемой ВЛ, сравнительно невелико. В общем случае, когда влияющие линии расположены с обеих сторон контролируемой ВЛ, а уровни токов короткого замыкания одинаковы, оптимальным является горизонтальное размещение МЭ ( $a=0$ ).

Относительная величина помехи при размещении влияющих и измеряемых токов в одной плоскости

$$v = \frac{1}{1 + (l/y)^2} \frac{I_{\text{ном}}}{I},$$

где  $l$  — расстояние между двумя ближайшими проводами влияющей линии с током  $I_{\text{ном}}$  и контролируемой с током  $I$ .

При размещении МЭ непосредственно под проводами контролируемой ВЛ ( $l=3D$ ,  $|I_{\text{ном}}|=|I|$ )  $v=2,7\%$ . В случае, если помеха превышает допустимую, необходимо использование дополнительных МЭ, размещаемых в соответствии с методикой, изложенной в настоящей статье.

Все рассмотренные погрешности являются относительными, т. е. не приведены к номинальным токам. Они должны рассматриваться стохастически. В конкретных случаях измерения, например при исследованиях волновых процессов или при испытаниях на высоковольтных линиях, они могут быть сведены к минимуму. Однако в условиях длительной эксплуатации, например для релейной автоматики, они должны учитываться.

**Влияние формы и размеров стержневых концентраторов на степень усиления индукции магнитного поля в зазорах между стержнями.** Усиление индукции магнитного поля ферромагнитным стержневым концентратором основано на том, что при внесении ферромагнитного стержня в магнитное поле распределение последнего меняется таким образом, что в центральном сечении концентратора индукция магнитного поля увеличивается. Степень усиления поля в зазоре концентратора по сравнению с внешним полем принято характеризовать коэффициентом усиления  $K_y=B_3/B_0$ , где  $B_3$  — индукция поля в зазоре концентратора;  $B_0$  — индукция внешнего (измеряемого) поля.

Связь индукции в цилиндрическом стержне  $B_c$  с внешним полем имеет следующий вид:

$$\mu_t = \frac{B_c}{\mu_0 H_0} = \frac{\mu}{1 + N(\mu_t - 1)},$$

где  $\mu_t$  и  $\mu$  — относительные магнитные проницаемости тела и материала;  $N$  — коэффициент размагничивания стержня.

Если в стержне имеется узкий зазор, перпендикулярный его продольной оси, то индукцию магнитного поля в зазоре с большой точностью можно считать равной индукции магнитного поля в стержне ( $B_c \approx B_3$ ). Таким образом,  $\mu_t \approx B_3 / (\mu_0 H_0) = K_y$ . Реально  $\mu > \mu_t > \mu_t'$ . Для эллипсоида, помещенного в однородное поле,

$$N = \frac{1}{\lambda^2 - 1} \left[ \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) - 1 \right],$$

где  $\lambda$  — отношение длин главных осей эллипсоида.

Как показано в [Л. 16], коэффициент размагничивания цилиндра в однородном поле с точностью выше 1% может быть подсчитан по формуле

$$N = \frac{\lambda}{\lambda^2 - 1} \left[ \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \ln 0,6 (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) - 1 \right], \quad (26)$$

а при  $\lambda \geq 10$  по формуле

$$N = \frac{1}{\lambda^2} (\ln 1,2\lambda - 1). \quad (27)$$

Из формулы (27) видно, что чем тоньше и длиннее стержень концентратора, тем больше коэффициент усиления. Так, при длине стержней  $2 \times 100$  мм, диаметре 11 мм, зазоре 0,5 мм  $K_y=65$ . Для увеличения коэффициента усиления вдвое при прочих равных условиях необходимо длину стержней концентратора также увеличить в два раза [Л. 15]. Однако при измерениях в неоднородном поле применение длинных стержней может повлечь снижение точности измерений. Кроме того, длинные стержни быстрее намагничиваются, что приводит к уменьшению диапазона, в котором сохраняется линейность измерений. Средняя магнитная проницаемость ферритового цилиндра

$$\mu_{t,0} = \frac{N \cdot 0,745}{1 + 0,765 N_{3,0} (\mu - 1)}, \quad (28)$$

где  $N_{3,0}$  — коэффициент размагничивания эквивалентного эллипсоида, длина продольной оси которого равна  $l_c$  — высоте цилиндра, а длина поперечной оси равна  $d$  — его диаметру.

При бесконечно узком зазоре коэффициент усиления поля в зазоре может быть принят равным величине магнитной проницаемости  $K_y \approx \mu_{t,0}$ . Однако при конечной толщине зазора эта формула даст значительную погрешность.

Как показано в [Л. 17], коэффициент усиления цилиндрического концентратора с точностью до 2% может быть определен по следующей формуле:

$$K_y = \frac{l_c + \delta_3}{\delta_3 + l_c / \mu_{t,0}}. \quad (29)$$

Из (29) следует, что при бесконечном уменьшении зазора ( $\delta_3 \rightarrow 0$ ) коэффициент усиления цилиндра стремится к коэффициенту усиления эквивалентного цилиндра ( $K_y \rightarrow \mu_{t,0} = B_c / B_0$ ).

Подставляя (28) в (29), получаем

$$K_y = \frac{\mu \cdot 0,745 (l_c + \delta_3)}{0,745 \delta_3 \mu + l_c (1 + 0,765 N_{3,0} \mu)}. \quad (30)$$

В качестве концентраторов поля могут быть использованы ферриты и более сложной формы. Как будет показано ниже, это даст возможность сохранить коэффициент усиления концентратора при уменьшении его линейных размеров. Величина  $K_y$  при прочих равных условиях определяется отношением площади, с которой как бы стягиваются силовые линии внешнего поля, к площади поперечного сечения концентратора в месте размещения преобразователя Холла (в действительности, конечно, мы имеем дело с полем собственной намагниченности стержня, линейно зависящим от внешнего поля). Поэтому вместо цилиндрических могут быть использованы конусообразные, либо грибообразные концентраторы поля.

В связи со значительными трудностями аналитического расчета концентраторов сложных форм в свое время были проведены их экспериментальные исследования в электролитической ванне и на физической модели. При этом установлено, что при одинаковых площадях поперечных сечений и одинаковой высоте, концентраторы конусообразной и грибообразной формы обладают коэффициентом усиления примерно в два раза большим, чем у цилиндрического. Различие же в коэффициентах усиления концентраторов конусообразной и грибообразной форм невелико.

Наиболее радикальным и простым способом увеличения коэффициента усиления является соосное размещение одинаковых ферритовых цилиндров, в зазорах между которыми помещаются преобразователи Холла. При этом коэффициент усиления может быть рассчитан по (30). Так, для концентратора, состоящего из пяти ферритовых стержней марки Н-400 длиной 160 мм, диаметром 8 мм и при зазоре  $\delta_3=0,39$  мм  $K_y=156$ . Выражение для точного определения коэффициента усиления концентратора МЭ получено в [Л. 17]:

$$K_y = \frac{l_c + \delta_3}{\delta_3 + \frac{\mu}{\mu_0}}. \quad (31)$$

Эквивалентный коэффициент рассеяния

$$K_{p.s.} = 1 + \frac{\delta_3}{d} \sum_1^{\infty} \frac{K_1 \left( \frac{k\pi l}{2L} \right)}{k\pi K_0 \left( \frac{\pi dk}{2L} \right)} \left\{ \frac{L \sin \left( \frac{k\pi \delta_3}{2L} \right)}{0,5 \delta_3 k\pi} \times \right. \\ \times [1 - (-1)^{k+1}] - \cos \left( \frac{k\pi \delta_3}{2L} \right) [1 - (-1)^k] + (-1)^{k+1} \times \\ \times \cos \left( \frac{\delta_3 k\pi}{L} \right) + 1 \left. \right\} \left\{ \frac{8L}{Lk\pi} \left[ \sin \frac{\pi k}{2} - \right. \right. \\ \left. \left. - \sin \left( \delta_3 \frac{k\pi}{2L} \right) \right] - 4 \cos \left( \frac{k\pi \delta_3}{2L} \right) \right\},$$

где  $L=l_c+\delta_3$ ;  $K_0$  — модифицированная цилиндрическая функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $K_1$  — модифицированная цилиндрическая функция Бесселя второго рода первого порядка.

**Частотные характеристики и основные параметры МЭ.** При исследовании частотных зависимостей МЭ помещается в однородное магнитное поле катушки соленоида. Измерения проводились в частотном диапазоне от 0,03 до 20 кГц, в котором работают токоизмерительные устройства как существующих, так и большинства проектируемых релейных защит. В указанном частотном диапазоне выходной сигнал МЭ линейно зависит от напряженности измеряемого поля и не зависит от частоты.

Линейность амплитудно-частотной зависимости достигалась благодаря подключению к выходу преобразователей Холла индукционной компенсирующей катушки, размещенной на ферритовом стержне концентратора поля и включенной встречно по отношению к индукционной наводке на выходных цепях МЭ. Индукционная наводка при частоте 20 кГц и его амплитуде  $H=10$  А/м равнялась

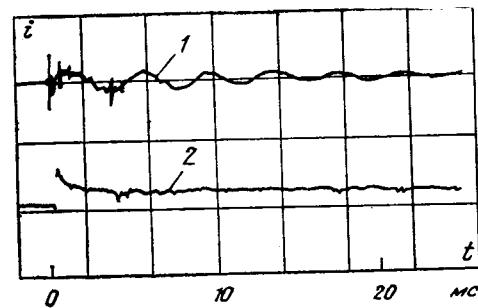


Рис. 4.

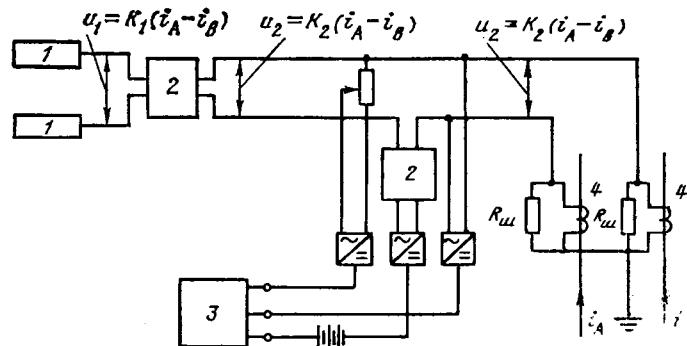


Рис. 5.

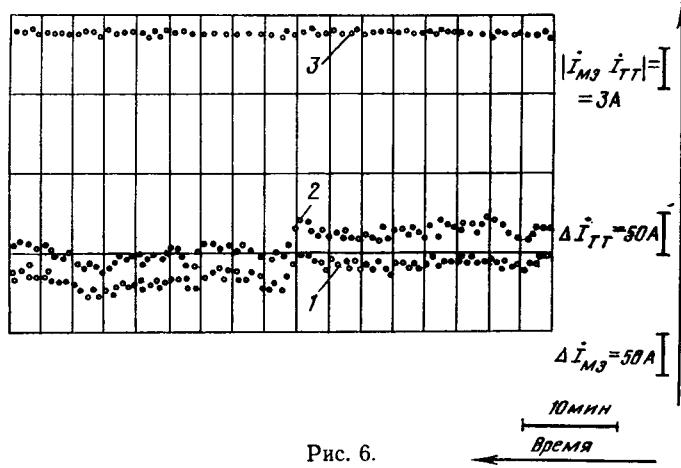


Рис. 6.

5 мВ. После включения в выходную цепь МЭ компенсирующей катушки индукционную наводку удалось уменьшить до 100 мкВ при полезном сигнале 1,7 мВ. Необходимо отметить, что наводка индуцируется в основном на выходных выводах преобразователей Холла, тогда как наводка на монтаже не превысила 75 мкВ. При снятии частотно-фазовой характеристики МЭ в данном частотном диапазоне сдвига по фазе между током катушки соленоида и выходным сигналом МЭ обнаружено не было. Основные параметры испытуемого МЭ: длина 1 м; масса 3 кг; чувствительность 0,17 мВ·А/м; коэффициент усиления концентратора 156; рабочий частотный диапазон 0,03–20 кГц; диапазон линейности измерений 0–280 А/м.

**Полевые испытания устройств дистанционного измерения токов.** Работоспособность устройств проверялась в полевых условиях на ВЛ 750 кВ «Опытная» со стороны подстанции «Белый Раст» —

750 кВ. Измерения производились в течение 7 месяцев при разных погодных условиях, что дало возможность проверить работоспособность МЭ в диапазоне температур от +21 до  $-42^{\circ}\text{C}$ . Для измерения относительной и угловой погрешностей в стационарных и квазистационарных режимах в качестве сравниваемого (образцового) сигнала был принят сигнал трансформатора тока класса точности 0,5. Поскольку по осциллограмме трудно определить угловую погрешность устройства в интервале долей градуса, определение угловой погрешности производилось с помощью потенциометра по схеме повышенной точности. Результаты измерений показали, что в вышеуказанном диапазоне температур и при различных токах ВЛ угловая погрешность не превышает  $7'$ , а относительная токовая погрешность —  $6\%$ .

На рис. 4 приведена осциллограмма тока включения в средней фазе С ненагруженной линии 750 кВ «Опытная — Белый Раст». На этой осциллограмме кривая 1 — сигнал от МЭ; кривая 2 — сигнал от трансформатора тока. Частота колебательного процесса совпадает с полученной приближенным расчетом для ненагруженной линии с учетом индуктивности автотрансформатора с точностью до 15%. Из осциллограммы видно, что высоковольтный трансформатор тока в сущности передает лишь собственный переходный процесс. Магниточувствительным элементом зарегистрирован не только колебательный процесс в линии, но и горение дуги при включении выключателя. Таким образом, МЭ могут быть использованы не только для целей релейной защиты, но и при проведении испытаний высоковольтной аппаратуры ВЛ СВН для исследования волновых процессов в линиях высшего напряжения.

Разности токов, измеряемые МЭ и трансформаторами тока, записывались на самописце. На рис. 5 изображена схема регистрации одноименной разности фазных токов, измеряемых МЭ и трансформатором тока, позволяющая сравнивать их сигналы не только по величине, но и по фазе. На рис. 6 приведены кривые разностей фазных токов, записанных самописцем. Здесь кривая 1 — разность фазных токов, измеренная МЭ; кривая 2 — та же величина, измеренная трансформатором тока; кривая 3 — мгновенная разность сигналов от МЭ и трансформаторов тока. Как видно из приведенных кривых, все изменения нагрузки ВЛ фиксируются

МЭ. Порог чувствительности устройства дистанционного измерения токов не ниже порога чувствительности трансформаторов тока. Некоторые локальные различия в форме кривых 1 и 2 объясняются временными промежутками по 4—8 с между соответствующими измерениями.

При проведении экспериментов авторам была оказана большая помощь В. А. Вершковым, Л. В. Жуковым, А. Б. Вагановым.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И. Н. Об использовании переходных процессов и внешних источников контроля для выполнения устройств релейной защиты. — В кн.: Вопросы оптимального развития энергетики и новые технические средства защиты. — М.: Наука, 1970.
2. Robertson. New trends in protective relays. — IEEE Dept. of Electrical Engineering University of Toronto, Canada, proc. ISCAS/70.
3. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем. — М.: Энергия, 1976.
4. Обзор принципов выполнения устройств, замещающих трансформаторы тока. — М.: Изд-ние Информэнерго, 1971.
5. Rogers A. I. Optical methods for measurement of voltage and current on power system. — Optical and Laser Technology, 1977, December.
6. Релейная защита и противоаварийная автоматика. — В кн.: Перевод докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-76). — М.: Энергия, 1978.
7. Сирота И. М. Схема индукционного измерения токов в трехфазных цепях высокого напряжения. — Электричество, 1967, № 4.
8. Вайс Г. Физика гальваниомагнитных полупроводниковых преобразователей и их применение. — М.: Энергия, 1974.
9. Правила техники безопасности при эксплуатации воздушных линий. — М.: Энергия, 1966.
10. Prasad N. R., Adamson K., Ender R. C. Fundamentals of electrostatic and magnetostatic transmission line fields. — IEEE Power Eng. Soc., Pap. Summer Meet., Portland, 1976.
11. А. с. № 230964 (СССР). Способ суммирования выходного напряжения датчиков Холла/ Э. А. Меерович, Л. И. Андреевская. Опубл. в Б. И., 1968, № 35.
12. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. — М.: Физматгиз, 1968.
13. Ферриты и ферромагнетики. 1968.
14. Назаров П. А. Влияние токов в земле на показания датчиков дистанционного измерителя токов в высоковольтных ЛЭП. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1972, № 6.
15. Weis H. Siemens Zeitschrift, 1957, № 8.
16. Розенблат А. М. Коэффициенты размагничивания стержней высокой проницаемости. — ЖТФ, 1954, XXIV, № 4.
17. Назаров П. А. Исследование магнитных полей в связи с разработкой дистанционных измерителей тока: Автореф. дис. на соиск. учен. степени к-та техн. наук, 1972 г.
18. Казанский В. Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. — М.: Энергия, 1969.

[24.12.79]



УДК 621.372.22.001

## Принципы электродинамической теории цепей

ТОЗОНИ О. В.  
Киев

**Введение.** В современной технике широко применяют электромагнитные системы, состоящие из большого числа компонентов — устройств, в которых протекают электромагнитные процессы, сопровождающиеся преобразованиями видов энергии, и соединяющих компоненты проводов, служащих для направления движения энергии.

Для расчета таких систем применяют классическую теорию цепей и однородных линий. Однако часто эта теория оказывается непригодной. Так, например, если провода системы изогнуты, непараллельные, перекрещивающиеся, окружающая среда неоднородная, проводящая или ферромагнитная, провода разных участков системы и соседние

системы близко расположены друг к другу, расчет классическими методами будет неточным и недостоверным. Классическая теория упускает из рассмотрения существенные проявления электромагнитного процесса, такие как электромагнитные на-водки напряжений и токов в изогнутых, непараллельных и перекрещивающихся проводах, утечки токов из проводов, потери энергии в окружающей среде и излучение. Между тем устойчивая тенденция развития техники состоит в повышении частоты токов в системах у уплотнении монтажа их компонентов. Оба этих фактора ведут к усилению влияния электромагнитного поля на распределение токов в системе [Л. 1 и 2], а следовательно, к непригодности классической теории для ее исследования.

Можно привести много примеров систем, в которых поле проводов сильно влияет на весь электромагнитный процесс, причем классическими методами это влияние нельзя учесть. Это высоковольтные линии с непараллельными транспонированными и провисающими проводами, рельсовые цепи электрифицированных железных дорог и сети подземных трубопроводов с устройствами электрозащиты от коррозии, печатные схемы СВЧ-диапазона, микросхемы и интегральные схемы вычислительной техники, различные типы сложных проволочных антенн и антенных решеток и т. п. Анализ электромагнитных процессов в таких системах методами теории поля связан с большими трудностями [Л. 3—5]. Распространение теории электрических цепей на этот класс электромагнитных систем является важной и актуальной задачей.

Ниже изложены принципы электродинамической теории цепей, которая подобно классической теории, оперируя только с токами и потенциалами, в то же время отражает электромагнитный процесс в системе, учитывая электромагнитные взаимодействия между ее элементами и влияние окружающей среды. Объективным условием построения такой теории являются специфические особенности конструкций рассматриваемого класса систем: протяженность проводов, которая приводит к почти линейному распределению источников поля, и электромагнитная автономия компонентов.

Многообразие реальных устройств (компонентов системы) в теории цепей представляют одним обобщенным элементом цепи — многополюсником. Подобно этому все многообразие реальных конструкций соединительных проводов (линии связи, кабели, фидеры, печатные платы, межсоединения, контактные дорожки и т. п.) представим обобщенным элементом цепи — коммуникатором. Коммуникатором назовем совокупность проводов, окружающих их диэлектриков и экранов, включенных между многополюсниками.

Коммуникаторы часто не обладают электромагнитной автономией, электромагнитный процесс в каждом из них не всегда можно выделить из электромагнитного процесса всей системы. В отличие от многополюсников, являющихся стандартными элементами, при проектировании цепи для каждого коммуникатора приходится рассчитывать свою индивидуальную конструкцию. Можно сказать, что проектирование электрической цепи сводится к вы-

бору номиналов многополюсников и проектированию конструкций ее коммуникаторов. Поэтому теория коммуникаторов должна быть частью электродинамической теории цепей и не может быть выделена из нее, как это произошло с теорией многополюсников.

Теории коммуникаторов в виде длинных линий общеизвестны [Л. 4, 6—8], однако они охватывают только простейшие конструкции коммуникаторов и не в состоянии описать все многообразие форм соединений, встречающиеся на практике. Попытки применить уравнения однородных линий для анализа коммуникаторов с криволинейными, непараллельными и короткими проводами приводят к противоречию законам электродинамики. Поэтому возникла необходимость создания математической модели коммуникатора, инвариантной относительно форм соединительных проводов и структуры окружающей их среды.

**Уравнения коммуникатора.** Математическая модель коммуникатора основана на строгой электродинамической модели, в которую для упрощения введены следующие общие свойства, присущие по-лю рассматриваемых систем:

1. Внешнее поле системы, определяющее электромагнитные взаимодействия между ее элементами и рассеяние энергии в окружающей среде, создается токами и зарядами коммуникаторов.

2. Компоненты системы обладают электромагнитной автономией, проявляющейся в том, что собственное поле компонента практически локализовано в его объеме, а его «вклад» во внешнее поле системы такой же, каковой был бы у включенного вместо компонента отрезка провода длиной, равной длине компонента.

3. Протяженная форма проводов (малые размеры сечений по сравнению с длиной) обусловливает распределение токов и зарядов в них близкое к линейному. Иначе говоря, поле реального коммуникатора мало отличается от поля идеального коммуникатора с теми же токами и линейными зарядами, но бесконечно тонкими проводами. Кроме того, протяженная форма приводит к одномерной структуре поля тока в проводе и к простой связи между током и зарядом на проводе. Поэтому электромагнитный процесс в коммуникаторе можно определить, зная распределение только тока, либо только линейного заряда.

4. Резкое различие электрических характеристик металла проводов и окружающей среды вызывает излом вектора плотности тока. Направление линий тока смещения на поверхности провода перпендикулярно направлению линий тока в проводе. Так как форма провода цилиндрическая, то на его поверхности векторы плотности тока смещения лежат в плоскости его поперечного сечения. Вследствие гладкости потенциальных функций такая плоская структура поля сохраняется в тонком трубчатом слое среды, окружающей провода (рис. 1). За пределами трубчатого слоя электромагнитное поле в общем случае не потенциально и имеет существенно трехмерную структуру, которая тем сложнее, чем сложнее форма осей проводов.

5. Каждый малый отрезок элементарной трубы тока в проводе эквивалентен электрическому

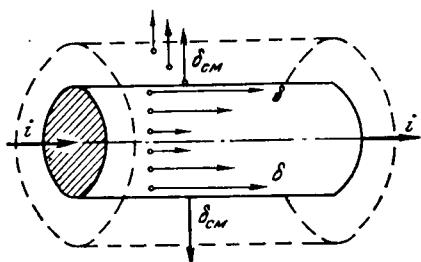


Рис. 1.

диполю, создающему в окружающей среде электромагнитное поле. Поскольку среда линейная, поле коммуникатора можно найти наложением полей всех диполей, заполняющих объем его проводов. Такое расчленение тока в цепи на элементарные диполи позволило учесть влияние неоднородной среды, окружающей цепь. Поле диполя в неоднородной среде с простыми границами раздела находят аналитически, и его точное выражение вводят в уравнения коммуникатора.

Используя перечисленные особенности структуры поля как дополнительную информацию об электромагнитном процессе в коммуникаторе, из уравнений электродинамики была получена полная система функциональных уравнений относительно распределения тока вдоль осей его проводов [Л. 9—12]. Для однородной неограниченной среды уравнения имеют следующий вид:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial l} = R_0 i(l) + \frac{\partial A_{l_{cp}}}{\partial l}; \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial l} = c \frac{\partial}{\partial l} [\phi(l) - \phi_0(l)]; \quad (2)$$

$$A_{l_{cp}}(l_Q) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_L i(l_M t') \frac{l_Q l_M}{r_{QMA}} dl_M; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial l}(l_Q) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_L \left( \nabla_Q \frac{i(l_M t')}{r_{QM\phi}} dl_M \right), \quad (4)$$

где  $R_0$  — омическое сопротивление единицы длины провода;  $c = \epsilon_0 g_0$  — емкость единицы длины трубчатого слоя среды, окружающей провод;  $g_0$  — геометрическая проводимость провода;  $i$  и  $\phi$  — ток и скалярный электрический потенциал в сечении провода;  $\phi_0$  и  $A_{l_{cp}}$  — средние значения скалярного и осевой компоненты векторного запаздывающих потенциалов соответственно на внешнем контуре сечения трубчатого слоя среды и в сечении провода;  $t' = t - \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} r_{QM}$ ;  $r_{QM}$  — расстояние между точками  $l_Q$  и  $l_M$  на оси провода;  $r_{QMA} = \sqrt{r_{QM}^2 + R_A^2}$ ;  $r_{QM\phi} = \sqrt{r_{QM}^2 + R_\phi^2}$ ;  $R_A$  и  $R_\phi$  — малые параметры;  $\mathbf{l}_Q^0$  и  $\mathbf{l}_M^0$  — единичные векторы касательных к оси провода в точках  $l_Q$  и  $l_M$ . Координата  $l$  отсчитывается вдоль оси провода.

В теории коммуникаторов уравнение (1) заменяет второе уравнение Кирхгофа и отражает ра-

венство электрических сил в любом сечении провода. Величину  $\partial\phi/\partial l$  можно интерпретировать как часть сторонней э. д. с., приходящейся на единицу длины провода. Эта часть э. д. с. уравновешивается омическим падением напряжения  $R_0 i$  и индуцируемым напряжением  $\partial A_{l_{cp}}/\partial l$  в единице длины провода. Уравнение (2) показывает, что изменение тока вдоль провода происходит за счет тока смещения через его боковую поверхность. Так как в пределах трубчатого слоя поле потенциальное и трубчатый слой ограничен эквипотенциалами, ток смещения пропорционален разности потенциалов на внутреннем и внешнем контурах сечения слоя (подобно току смещения в коаксиальном кабеле).

При уменьшении толщины трубчатого слоя геометрическая проводимость  $g_0$  и емкость  $c$  будут неограниченно расти. Чтобы при этом уравнение (2) сохранило смысл, потенциал  $\phi_0$  должен стремиться к значению потенциала  $\phi$  на проводе. Иначе говоря, уравнение (2) справедливо при условии непрерывности скалярного потенциала при переходе через поверхность провода. Однако потенциал  $\phi$  определяется интегрированием уравнения (1) с точностью до постоянной. Поэтому, чтобы на поверхности провода потенциалы  $\phi$  и  $\phi_0$  совпали, достаточно приравнять их в какой-либо одной точке поверхности  $Q_i$ , приняв

$$\phi(Q_i) = \phi_0(Q_i), \quad (5)$$

либо удовлетворить какому-либо равносильному (5) условию, например приравнять нуль полный ток смещения из всего контура цепи.

**Контурные потенциалы коммуникатора.** Вследствие протяженной формы проводов за пределами трубчатого слоя потенциалы  $A$  и  $\phi_0$  реального коммуникатора мало отличаются от потенциалов идеального коммуникатора (3), (4) с теми же токами и нелинейными зарядами, но бесконечно тонкими проводами. Потенциалы идеального коммуникатора названы контурными, так как они выражаются через контурные интегралы, взятые вдоль осей проводов. Вычислять контурные потенциалы проще, чем реальные, но при приближении к оси провода они теряют смысл, так как неограниченно растут. Поскольку контурные потенциалы принимают любые значения в интервале  $[0, \infty]$ , то средние значения потенциалов  $A_{l_{cp}}$  и  $\phi_0$  в уравнениях (1) и (2) целесообразно выразить через значения контурных потенциалов в некоторых точках, отстоящих от оси провода на малых расстояниях  $R_A$  и  $R_\phi$ , как это и сделано в формулах (3) и (4). Однако такое приближение приводит к удовлетворительным результатам лишь при условии, что расстояние между проводами коммуникатора превышает удвоенный диаметр их сечений. Если это условие не выполняется, то формулы (3) и (4) следуют уточнить, задавшись предполагаемым распределением тока в сечении проводов. При высоких частотах ток течет тонким слоем по поверхности провода и его распределение подобно распределению статического заряда. Поэтому, например, распределение поверхностной плотности тока по ширине тонкого полоскового провода можно принять

равным:

$$J(x) = \frac{i(l)}{\pi \sqrt{d^2 - x^2}}. \quad (6)$$

Подставив это распределение в формулу Кирхгофа для запаздывающих потенциалов и интегрируя по ширине полоски, получим более точное, чем (3), выражение для контурного потенциала  $A$ . При этом полезно учесть, что волна бежит вдоль провода, то есть в любом его сечении плотность источников меняется синфазно, а распределение (6) равносильно постоянному значению потенциала  $A$  в сечении провода.

Уточненное выражение для скалярного потенциала не трудно получить, воспользовавшись соотношением Лоренца:

$$\nabla \cdot A = -\mu \epsilon \frac{\partial \varphi_0}{\partial t}. \quad (7)$$

**Параметры коммуникатора.** Для простых форм сечений проводов (круглого и пленочного) параметры  $g_0$ ,  $R_A$  и  $R_\varphi$ , входящие в уравнения коммуникатора, определяются достаточно точно. Так, на каждом участке  $\Delta l$  провода круглого сечения радиуса  $R$ , который можно считать прямолинейным, структура электрического поля в трубчатом слое и магнитного поля в сечении провода почти плоская. Потенциалы здесь почти логарифмические, а электрические эквипотенциальные ( $\varphi_0 = \text{const}$ ) и силовые магнитные ( $A_l = \text{const}$ ) линии представляют собой окружности (рис. 2). Такая форма линий поля определяется распределением заряда и тока в проводе в непосредственной близости от рассматриваемого сечения. Значение же потенциалов зависит от распределения зарядов и токов на всех проводах коммуникатора. Поэтому для круглого провода внешний контур сечения трубчатого слоя надо выбирать также в виде окружности радиуса  $(1+v)R$  с центром на оси провода. Тогда значения потенциала  $\varphi_0$  реального коммуникатора на обеих окружностях сечения трубчатого слоя совпадут со значениями контурного потенциала (4) на тех же окружностях, так как в пределах трубчатого слоя эквипотенциали контурного потенциала также образуют семейство концентрических окружностей.

Таким образом, для провода круглого сечения радиуса  $R$  имеем

$$R_\varphi = (1+v)R, \quad (8)$$

где  $vR$  — толщина трубчатого слоя.

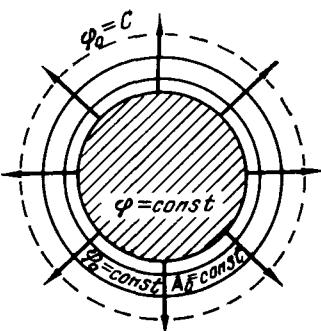


Рис. 2.

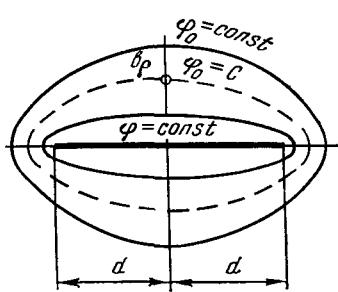


Рис. 3.

Геометрическая проводимость  $g_0$  трубчатого слоя, окружающего круглый провод, определяется формулой

$$g_0 = \frac{2\pi}{\ln(1+v)}. \quad (9)$$

Если сечение провода отличается от круга, то при замене реального потенциала  $\varphi_0$  контурным для вычисления параметров  $R_\varphi$  и  $g_0$  надо заменить провод эквивалентным круглым проводом. Для этого сечение выбранного трубчатого слоя надо конформно отобразить на круглое кольцо с внутренним  $R$  и внешним  $R_\varphi$  радиусами. Тогда при одной и той же величине линейного заряда  $\tau$  на реальном и идеальном коммуникаторах разность потенциалов на контурах сечения трубчатого слоя и окружностях кольца будет одинаковой. Так, эквипотенциальные линии плоского поля, окружающего пленочный провод шириной  $2d$  (рис. 3), образуют семейство конфокальных эллипсов, поэтому внешний контур сечения трубчатого слоя следует выбрать в виде эллипса с малой полуосью  $b_\varphi = vd$ . Конформно отображая эллипс с разрезом на круговое кольцо, найдем:

$$R_\varphi = d(v + \sqrt{1+v^2}); \quad g_0 = \frac{2\pi}{\ln(v + \sqrt{1+v^2})}. \quad (10)$$

Сложнее обстоит дело с определением параметра  $R_A$ . Распределение векторного потенциала по сечению провода зависит от распределения тока в этом сечении, которое, в свою очередь, зависит от частоты. Однако при высокой частоте глубина проникновения электромагнитной волны в металл очень мала и можно считать, что ток полностью вытесняется на поверхность провода. Поэтому для провода круглого сечения можно принять  $R_A = R$ . Для пленочного провода шириной  $2d$  и толщиной пленки  $h$  при высокой частоте тока

$$R_A = h + \sqrt{d^2 + h^2} \approx d. \quad (11)$$

В [Л. 11] показано, что система уравнений (1) — (4), записанная для двух длинных прямолинейных параллельных проводов круглого сечения (для однородной линии), переходит в систему телеграфных уравнений.

**Уравнения коммуникатора с синусоидальными токами.** Если в электромагнитной системе э. д. с. и токи изменяются во времени синусоидально, то все электрические величины можно заменить их комплексными изображениями и упростить уравнения коммуникатора. В этом важном для приложений случае возможности изложенной теории расширяются. Она становится применимой для коммуникаторов с проводами, расположенными в кусочно-однородных и слабопроводящих средах. Система уравнений коммуникатора принимает следующий вид:

$$-\frac{d\varphi}{dt} = R_\varphi \dot{I}(l) + j\omega \dot{A}_{t_{cp}}(l); \quad (12)$$

$$-\frac{di}{dt} = (g + i\omega c) [\varphi(l) - \varphi_0(l)]; \quad (13)$$

$$\dot{A}_{t_{cp}}(l_Q) = \int_L \dot{I}(l_M) \dot{\Psi}_A^*(l_Q l_M) + \dot{A}_k(l_Q); \quad (14)$$

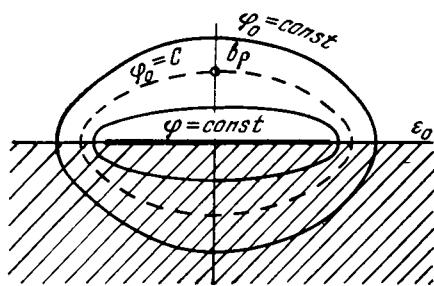


Рис. 4.

$$\dot{\varphi}_0(l_Q) = \int_L \dot{I}(l_M) \dot{\Psi}_\varphi(l_Q l_M) dl_M + \dot{\varphi}_k(l_Q), \quad (15)$$

где  $g = \gamma g_0$  — погонная электрическая проводимость трубчатого слоя среды, окружающей провод;  $\dot{A}_k$  и  $\dot{\varphi}_k$  — средние значения составляющих потенциалов, обусловленные источниками, распределенными вне проводов рассматриваемого коммуникатора;  $\Psi_A$  и  $\dot{\Psi}_\varphi$  — функции, выражающиеся через векторный и скалярный запаздывающие потенциалы единичного диполя в кусочно-однородной среде. Их выражения для простых форм границ раздела сред и слоистых сред, встречающихся на практике, найдены аналитически [Л. 10 и 11].

Исключив контурные потенциалы (14) и (15) из системы уравнений (12) — (15), получим два интегродифференциальных уравнения коммуникатора с синусоидальным током:

$$-\frac{d\dot{\varphi}}{dl} = R_0 \dot{I}(l) + j\omega \int_L \dot{I}(l_p) \dot{\Psi}_A(l, l_p) dl_p + j\omega \dot{A}_k(l); \quad (16)$$

$$-\frac{dl}{dl} = G \left[ \dot{\varphi}(l) - \int_L \dot{I}(l_p) \dot{\Psi}_\varphi(l, l_p) dl_p \right] - G \dot{\varphi}_k(l), \quad (17)$$

где  $G = g + j\omega c$ ;  $L$  — контур, образованный осями всех проводов коммуникатора.

Поле в трубчатом слое однородной среды, окружающей провод, имеет плоскую структуру, векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  лежат в плоскости поперечного сечения провода. Такая же структура поля в трубчатом слое будет и в том случае, когда пленочный провод лежит на плоской границе раздела двух сред (диэлектриков, либо плохих проводников) (рис. 4). Вследствие симметрии относительно границы картина поля напряженности  $\mathbf{E}$  сверху и снизу провода не изменится, изменится лишь распределение тока утечки и смещения в верхнюю и нижнюю среды, а следовательно, изменятся электрические проводимость и емкость трубчатого слоя. Электрический поток и ток утечки в пределах сечения трубчатого слоя границу раздела сред не пересекают, поэтому при конформном отображении сечения трубчатого слоя на прямоугольник верхняя и нижняя части сечения также отобразятся на прямоугольники с геометрическими проводимостями, равными половине  $g_0$ . При этом электрические проводимость и емкость трубчатого слоя определяются выражениями:

$$g = \frac{\gamma_e + \gamma_i}{2} g_0; \quad c = \frac{\epsilon_e + \epsilon_i}{2} g_0. \quad (18)$$

Уравнения (16), (17) составляют полную систему, позволяющую рассчитывать коммуникатор любой конструкции в однородной и кусочно-однородной среде с такими границами раздела, для которых можно получить аналитические выражения запаздывающих потенциалов единичного диполя.

**Локальные элементы электрической цепи.** Имея уравнения коммуникатора, можно составить уравнения электрической цепи, содержащей источники сторонней э. д. с.  $e$ , сопротивления нагрузок  $Z$  и узлы разветвлений.

В классической теории представление всех компонентов цепи в виде сосредоточенных основано на грубом допущении о независимости электромагнитного процесса в цепи от формы и размеров ее компонентов. В электродинамической теории цепей представление компонента (источника э. д. с. или нагрузки) сосредоточенным, равносильно представлению его включенным в бесконечно тонкий поперечный разрез провода. Такая идеализация влечет за собой разрыв первого рода в распределении скалярного потенциала и резкое увеличение интенсивности электрического поля и тока в окрестности сосредоточенного компонента [Л. 14]. Следовательно, в электродинамической теории цепей надо учитывать реальные размеры всех компонентов.

Для формального описания компонентов и разветвлений цепи введем в рассмотрение дельтаобразную  $\Pi$ -функцию, зависящую от двух параметров: длины участка  $\Delta_N$  и координаты  $l_N$  его центра на контуре  $L$ . Определим  $\Pi$ -функцию соотношением (рис. 5)

$$\Pi(l\Delta_N) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta_N}, & l \in \Delta_N; \\ 0, & l \notin \Delta_N, \end{cases} \quad (19)$$

где знаки  $\in$  и  $\notin$  означают, принадлежит или не принадлежит координата  $l$  отрезку  $\Delta_N$ . Из этого определения следует (рис. 6), что

$$\int_0^{l_M} \Pi(l\Delta_N) dl = \mathbf{1}(l_M l_N) = \begin{cases} 1, & l_M \geq l_N + \frac{\Delta_N}{2}; \\ \frac{l_M - l_N}{\Delta_N} + \frac{1}{2}, & l_M \in \Delta_N; \\ 0, & l_M < l_N - \frac{\Delta_N}{2}. \end{cases} \quad (20)$$

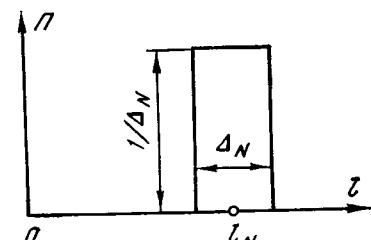


Рис. 5.

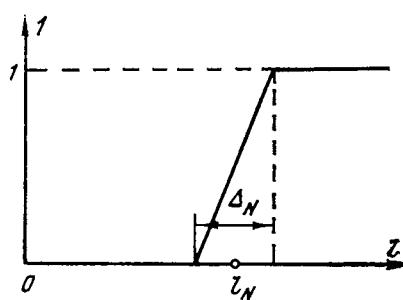


Рис. 6.

По аналогии с единичной функцией Хэвисайда  $E(l_M l_N)$  интеграл от  $\Pi$ -функции (20) назовем  $\Pi$ -единичной функцией. Из определения  $\Pi$ -функции следует, что если на участке  $\Delta_N$  функция  $f(l)$  принимает постоянные значения, то

$$\int_0^{l_M} f(l) \Pi(l \Delta_N) dl = f(l_N) 1(l_M l_N). \quad (21)$$

При уменьшении длины участка  $\Delta_N$  (в пределе при  $\Delta_N \rightarrow 0$ ) функции  $\Pi(l \Delta_N)$  и  $1(l \Delta_N)$  преобразуются соответственно в дельта-функцию Дирака и единичную функцию Хэвисайда.

Заменим реальные компоненты электромагнитной системы идеализированными локальными компонентами цепи. Под локальным компонентом будем понимать протяженный компонент, характеризуемый интегральными параметрами  $(\dot{e}, Z)$ , обладающий электромагнитной автономией и собственным внутренним электрическим полем, равномерно распределенным по длине  $\Delta$ -компонента. Длину локального компонента будем считать равной расстоянию между зажимами реального компонента. Участки  $\Delta$ , занимаемые на контуре цепи локальными компонентами — источниками э. д. с. и сопротивлениями нагрузок и координаты центров этих участков будем обозначать соответственно  $\Delta_\vartheta$ ,  $l_\vartheta$  и  $\Delta_N$ ,  $l_N$  и считать, что внутренняя электрическая напряженность равномерно распределена вдоль этих участков и касательна к ним, а «вклад» локального компонента во внешнее поле цепи равен «вкладу» соответствующего участка с тем же током. В месте разветвления цепи, на участке  $\Delta_D$  контура, равном линейному размеру поперечного сечения провода, ответвляющегося от узла, будем считать плотность тока нормальной к этому участку и равномерно распределенной вдоль него.

**Уравнения электрической цепи.** Введем при помощи  $\Pi$ -функций локальные компоненты и ответвления в уравнения коммуникатора (16) и (17). Пусть электрическая цепь состоит из разветвленного замкнутого контура  $L$  с включенными в него источниками э. д. с.  $\dot{e}(\Delta_\vartheta l_\vartheta)$  и нагрузками, сопротивления которых  $Z_1(l_{N1} \Delta_{N1})$  и  $Z_2(l_{N2} \Delta_{N2})$ . Два узла контура цепи расположены в точках с координатами  $l_{D1}$  и  $l_{D2}$ , а линейные размеры сечений ответвляющегося провода в узлах  $\Delta_{D1}$  и  $\Delta_{D2}$  (рис. 7). В отличие от обычной теории цепей будем считать, что контур  $L$  состоит из двух ветвей; первой, замкнутой  $l_3 l_{D1} l_{N1} l_{D2} l_3$  и второй ответвляющейся  $l_{D1} l_{N2} l_{D2}$ . Зададим направление токов в ветвях  $I_1$  и  $I_2$ . Первое уравнение цепи получим из первого уравнения

коммуникатора (16), введя в него локальные компоненты. Для замкнутой ветви получим:

$$-\frac{d\dot{\varphi}}{dl} = [R_0 + Z_1 \Pi(l \Delta_{N1})] I_1(l) - \dot{e} \Pi(l \Delta_\vartheta) + + i\omega \int_L \dot{I}(l_p) \Psi_A(l, l_p) dl_p + j\omega \dot{A}_k(l). \quad (22)$$

Для второй ветви

$$-\frac{d\dot{\varphi}}{dl} = [R_0 + Z_2 \Pi(l \Delta_{N2})] I_2(l) + + j\omega \int_L \dot{I}(l_p) \Psi_A(l, l_p) dl_p + j\omega \dot{A}_k(l). \quad (23)$$

На всех участках контура (кроме участков  $\Delta_\vartheta$ ,  $\Delta_{N1}$  и  $\Delta_{N2}$ ) эти уравнения совпадают с уравнениями коммуникатора, так как там значения  $\Pi$ -функций равны нулю. На участках  $\Delta_\vartheta$ ,  $\Delta_{N1}$  и  $\Delta_{N2}$  к значениям производной потенциала добавляются величины  $\dot{e}/\Delta_\vartheta$ ,  $\frac{Z_1 I_1(l_{N1})}{\Delta_{N1}}$ ,  $\frac{Z_2 I_2(l_{N2})}{\Delta_{N2}}$ , как это и

должно быть при принятой идеализации последовательно включенных в цепь компонентов.

Второе уравнение электрической цепи получим из второго уравнения коммуникатора (17), введя в него локально ответвляющийся ток  $I_2(l)$ . Для замкнутой ветви получим:

$$-\frac{dI_1}{dl} = G \left[ \dot{\varphi}(l) - \int_L \dot{I}(l_p) \Psi_\varphi(l, l_p) dl_p \right] - - G_{\varphi k}(l) + I_2(l_{D1}) \Pi(l \Delta_{D1}) - I_2(l_{D2}) \Pi(l \Delta_{D2}). \quad (24)$$

Для второй ветви

$$-\frac{dI_2}{dl} = G \left[ \dot{\varphi}(l) - \int_L \dot{I}(l_p) \Psi_\varphi(l, l_p) dl_p \right] - G_{\varphi k}(l). \quad (25)$$

Вытекающий из узла ток принят положительным, втекающий в узел — отрицательным. На всех участках (кроме  $\Delta_{D1}$  и  $\Delta_{D2}$ ) уравнения (24) и (25) совпадают со вторым уравнением коммуникатора. Но на участках  $\Delta_{D1}$  и  $\Delta_{D2}$ , соответствующих сечениям ответвляющегося провода, к величине производной тока добавляются значения  $\frac{I_2(l_{D1})}{\Delta_{D1}}$  и

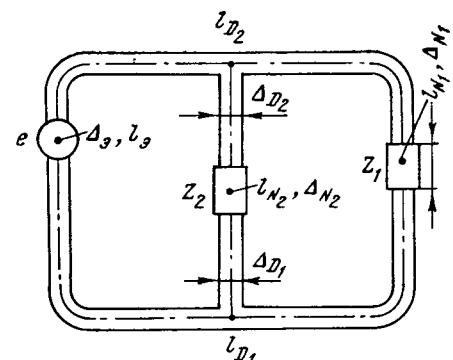


Рис. 7.

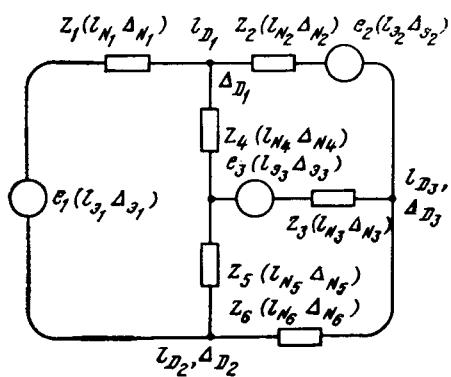


Рис. 8.

$\frac{I_2(l_{D2})}{\Delta_{D2}}$ , как это и должно быть при принятой идеализации ответвлений.

В общем случае, когда в контуре цепи включено  $n$  сопротивлений  $Z_i$  и  $m$  источников э. д. с.  $\dot{e}_i$ , а также встречается  $q$  разветвлений (рис. 8), уравнения электрической цепи имеют вид:

$$-\frac{d\dot{\varphi}}{dt} = \left[ R_0 + \sum_{i=1}^n Z_i \Pi(l \Delta_{N_i}) \right] \dot{I}(l) - \sum_{i=1}^m \dot{e}_i \Pi(l \Delta_{s_i}) + j\omega \int_L \dot{I}(l_p) \Psi_A(l, l_p) dl_p + j\omega \dot{A}_k(l); \quad (26)$$

$$-\frac{d\dot{I}}{dt} = G \left[ \dot{\varphi}(l) - \int_L \dot{I}(l_p) \Psi_\varphi(l, l_p) dl_p \right] - G \dot{A}_k(l) + \sum_{i=1}^q \dot{I}(l_{D_i}) \Pi(l \Delta_{D_i}). \quad (27)$$

Система уравнений (26) и (27) описывает распределение тока в линейной цепи вплоть до очень высоких частот. Доказано, что существует единственное решение этой системы. Решив систему и найдя распределение токов в проводах и компонентах цепи, не трудно рассчитать весь электромагнитный процесс.

**Трансформация уравнений цепи в интегральные.** Аналитическое решение системы уравнений (26) и (27) получить не удается. Приходится искать приближенное численное решение на ЭВМ. Для этого целесообразно интегродифференциальные уравнения цепи трансформировать в интегральные уравнения второго рода, алгоритм решения которых более универсален и требует меньших затрат машинного времени.

Процесс трансформации состоит в последовательном интегрировании уравнений цепи вдоль ее контура  $L$ , составленного из осей всех ее ветвей, и исключении одной из электрических величин (потенциала либо тока). В процессе трансформации должны быть согласованы потенциалы  $\varphi$  и  $\varphi_0$  и удовлетворены краевые условия на концах всех проводов цепи.

В результате задача расчета электрической цепи сводится к решению одного или системы инте-

гральных уравнений второго рода, каждое из которых можно привести к виду

$$\dot{I}(l_Q) + \int_L \dot{I}(l_p) \dot{K}(l_Q l_p) dl_p = \dot{f}(l_Q \dot{e} \dot{I}_k), \quad (28)$$

где  $\dot{e}$ ,  $\dot{I}_k$  — заданные э. д. с. или ток источников питания цепи;  $\dot{K}(l_Q l_p)$  — ядро уравнения, в общем случае выражющееся через криволинейные интегралы от функции  $\Psi_A$  и  $\Psi_\varphi$  и параметры компонентов.

Таким образом, получающиеся интегральные уравнения обладают устойчивым решением и содержат только криволинейные одномерные интегралы, вычислять которые можно с высокой точностью. В настоящее время разработаны приемы трансформации интегродифференциальных уравнений цепи, охватывающие все встречающиеся на практике конструкции коммуникаторов и последовательности соединений многополюсников [Л. 12, 15—18].

Несмотря на кажущуюся громоздкость интегральных уравнений цепи их численное решение на ЭВМ не составляет труда. Существующие программы позволяют рассчитывать распределение токов в разветвленных полосковых линиях, содержащих до 20 ветвей, в гальванически не связанных контурах произвольной формы, расположенных на одной подложке, кольцевые мосты, антенные решетки на плоском экране, разветвленные и многопроводные антенны, рельсовые цепи, сети подземных трубопроводов и т. п. После этого по формулам вычисляются наводки, взаимные влияния, матрицы сопротивлений и проводимостей, длины волн, диаграммы направленности излучений, потери энергии, запаздывание и т. д. Провода рассчитываемых коммуникаторов могут быть расположены на диэлектрической, полупроводящей или даже анизотропной кристаллической подложках, экранированных металлическими листами.

В том случае, когда коммуникаторы цепи обладают электромагнитной автономией, задача расчета цепи существенно упрощается. Расчет таких коммуникаторов можно провести отдельно от расчета всей цепи и свести его к определению связей между напряжениями и токами полюсов коммуникатора, т. е. найти матрицы сопротивлений и проводимостей. После этого коммуникаторы при расчете цепи можно учитывать так же, как обычные многополюсники.

Предлагаемая математическая модель электрической цепи является приближенной. Она использует результаты качественного анализа структуры электромагнитного поля цепи, исходит из приближенных распределений заряда и тока в сечении проводов, оперирует с контурными потенциалами вместо действительных. Но тем самым она существенно упрощает задачу расчета цепи, сохраняя главную информацию о геометрии проводов и структуре окружающей среды, правильно учитывая все основные электромагнитные связи между проводами. Точность модели тем выше, чем адекватнее она отражает реальный процесс в цепи и чем точнее определены контурные потенциалы и параметры трубчатого слоя в ее уравнениях (26) и

(27). И то, и другое зависит от формы и соотношений размеров проводов коммуникатора, а именно, чем меньше диаметры сечений проводов по сравнению с расстояниями между их осями, радиусом кривизны осей и длиной волны в окружающем диэлектрике, тем точнее математическая модель. Оценка и проверочные расчеты показали, что если расстояния между осями проводов и радиус кривизны осей превышают удвоенный диаметр их сечений, то модель обеспечивает вполне достаточную для практики точность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рамо С., Уиннери Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. — М.: Гостехиздат, 1948.
2. Вебер Э. Переходные процессы в линейных электрических цепях. — М.: Советское радио, 1958.
3. Зоммерфельд А. Электродинамика. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958.
4. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. — М.: Советское радио, 1957.
5. Смайт В. Электростатика и электродинамика. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1954.
6. Костенко М. В., Перельман Л. С., Шкарик Ю. П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. — М.: Энергия, 1973.
7. Мейнке Х., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. Т. 1. — М.: Госэнергоиздат, 1960.

8. Шимони К. Теоретическая электротехника. — М.: Мир, 1964.
9. Тозони О. В. Уравнения неоднородной линии. — Изв. вузов. Электромеханика, 1970, № 3.
10. Тозони О. В. О машинном проектировании интегральных схем СВЧ-диапазона. — Управляющие машины и системы, 1974, № 5.
11. Тозони О. В. Метод вторичных источников в электротехнике. — М.: Энергия, 1975.
12. Тозони О. В. Электродинамическая теория цепей. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1977, № 1.
13. Стреттон Дж. А. Теория электромагнетизма. — М.: Гостехиздат, 1948.
14. Вайнштейн Л. А., Фок В. А. Симметричные электрические колебания идеально проводящего полого цилиндра конечной длины III. — ЖТФ, 1967, т. 37, № 7.
15. Тозони О. В., Дианов В. И. Расчет электромагнитных взаимодействий между проводниками интегральных схем с кристаллической подложкой. — В кн.: Кибернетика и вычислительная техника. — Киев: Наукова думка, 1974, вып. 26.
16. Тозони О. В., Васильев В. Е. О расчете разветвленных цепей СВЧ-диапазона. — Докл. АН УССР. 1974, сер. А, № 11.
17. Тозони О. В. Электрические цепи с утечкой и их расчет. — В кн.: Кибернетика и вычислительная техника. — Киев: Наукова думка, 1975, вып. 30.
18. Тозони О. В. Дифференциальные уравнения электрической цепи переменного тока высокой частоты. — В кн.: Кибернетика и вычислительная техника. — Киев: Наукова думка, 1974, вып. 26.

[26.12.79]

УДК 621.311.16.001.24

## Определение экономичного режима гидро-тепловой энергосистемы

АРЗАМАСЦЕВ Д. А., ЛЕТУН В. М.

Свердловск

Рассмотрим новый метод решения задачи построения экономичного режима смешанной энергосистемы при фиксированном составе агрегатов тепловых станций [Л. 1—3]:

$$b^t_i = \frac{b^t_i}{1 - \sigma^t_i} = \lambda_i \frac{q^t_j}{1 - \sigma^t_j}, \quad i = 2, 3, \dots, n; \\ j = n+1, n+2, \dots, m; \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (1)$$

при условии баланса

$$P^t_n = \sum_{i=1}^n P^t_i + \sum_{j=n+1}^m P^t_j - \Pi^t \quad (2)$$

и ограничениях:

по запасу воды на гидростанциях

$$Q^t_j = \sum_{i=1}^T \int_{P^t_{j\min}}^{P^t_j} q^t_i dP; \quad (3)$$

по пределам активных мощностей станций

$$\left. \begin{array}{l} P^t_{i\min} \leq P^t_i \leq P^t_{i\max}; \\ P^t_{j\min} \leq P^t_j \leq P^t_{j\max}; \end{array} \right\} \quad (4)$$

по предельным потокам мощности в контролируемых линиях

$$P^t_{l\min} \leq P^t_l \leq P^t_{l\max}, \quad l \in L \quad (5)$$

где  $i=1, 2, \dots, n$  — номера тепловых электростанций;  $j=n+1, n+2, \dots, m$  — номера гидростанций;  $t$  — номер интервала внутри отрезка времени  $[0, T]$ , для которого определяется экономичный режим;  $b^t_i$  — относительный прирост расхода топлива балансирующего узла;  $b^t_i$  — относительный прирост расхода топлива  $i$ -й тепловой станции;  $q^t_i$  — относительный прирост расхода воды на  $j$ -й гидростанции;  $\sigma^t_i, \sigma^t_j$  — производные потери активной мощности по нагрузкам соответствующих станций;  $\lambda_i$  — множители Лагранжа;  $\Pi^t$  — потери активной мощности в сети;  $P^t_i, P^t_j, P^t_n, P^t_l$  — соответственно, мощности тепловых и гидростанций, нагрузка всех потребителей энергосистемы и поток мощности по линии  $l \in L$ , где  $L$  — непустое множество.

Для всех параметров задачи применяется обычная кусочно-постоянная аппроксимация на каждом  $t$ . Кроме этого, считается, что все  $b_i, q_j$  — монотонные неубывающие функции  $P_i$  и  $P_j$ .

Определение искомых параметров задачи возможно несколькими способами. Наибольшее распространение в настоящее время получил градиентный метод в сочетании с методом штрафных функций [Л. 2 и 3]. Однако расчеты на ЦВМ по этому методу выявили некоторые слабые его стороны. С одной стороны, весьма трудоемким оказался процесс выбора и корректировки значений коэффициентов  $\lambda_j$ , и с другой, конфигурация характеристик относительных приростов расхода топлива

(воды) сильно сказывается на скорости сходимости вычислительного процесса.

В приведенном в статье методе предпринята попытка ослабить указанные недостатки. Изложение ведется при упрощающем допущении о постоянстве напора на гидростанциях. В основу предлагаемого метода положен принцип последовательного введения в допустимую область и улучшения некоторого начального состояния системы, удовлетворяющего условию (4) при минимальных нагрузках гидростанций на всех  $t \in T$ .

Эти требования в общем случае могут привести к образованию на некоторых  $t$  дефицита генерируемой мощности. Возникшие дефициты устраняются увеличением генерируемой мощности балансирующего узла соответственно на каждом  $t$ . Для этого характеристика относительных приростов расхода топлива балансирующей станции дополняется фиктивной составляющей, начиная от фактической максимальной мощности этой станции и вплоть до достаточно большой величины. Новым значениям нагрузки балансирующей станции ставятся в соответствие увеличенные относительные приросты. Степень увеличения относительных приростов должна гарантировать первоочередную разгрузку балансирующей станции при перераспределении нагрузки.

Процесс спуска от построенного выше начального состояния к оптимальному разбивается на два этапа: оптимальное распределение нагрузки между тепловыми станциями на отдельных интервалах времени; оптимальное распределение нагрузки между ТЭС и ГЭС с учетом ограничений по расходу энергоносителя за период  $T$  в целом.

Перераспределение нагрузки между тепловыми станциями производится последовательно на каждом  $t$  за исключением тех интервалов, на которых при выборе начального состояния системы возник дефицит генерируемой мощности. Идея перераспределения заключается в отыскании такой пары станций  $i$  и  $k$ , перераспределение нагрузки между которыми дает максимальный эффект с точки зрения экономии топлива. Пусть в  $t$ -й интервал времени  $i$ -я тепловая станция разгружается на величину  $\Delta P^t_i$ , а  $k$ -я — загружается на величину  $\Delta P^t_k$ . Это приведет к экономии топлива на  $i$ -й станции на величину  $\Delta B^t_i$  и пережогу на  $k$ -й станции на величину  $\Delta B^t_k$ . Если величина отношения

$$\left| \frac{\Delta B^t_i}{\Delta B^t_k} \right| \quad (6)$$

строго больше единицы, то перераспределение нагрузок между станциями  $i$  и  $k$  эффективно.

Переходя к пределу в соотношении (6), получим:

$$\lim \left| \frac{\Delta B^t_i}{\Delta B^t_k} \right| = \frac{b^t_i}{b^t_k} \frac{1 - \sigma^t_k}{1 - \sigma^t_i}. \quad (7)$$

Выражение (7) можно интерпретировать как меру эффективности перераспределения нагрузки между станциями  $i$  и  $k$ : чем больше отношение в выражении (7), тем выгоднее перераспределение нагрузки между станциями  $i$  и  $k$ . Определим процедуру перераспределения нагрузки между станциями как многошаговый процесс, на каждом шаге

которого производится перераспределение нагрузки между той парой станций, для которой значение (7) больше, чем для любой другой пары станций.

В силу принятой монотонности характеристик относительных приростов значение (7) в процессе перераспределения нагрузки между рассматриваемыми станциями непрерывно уменьшается. Следовательно, на некотором шаге многошагового процесса наибольшие и равные значения (7) будут получены одновременно для нескольких пар станций, т. е. в перераспределении нагрузки будет участвовать группа станций. Вместе с тем процесс вовлечения в процедуру перераспределения новых и новых станций будет сопровождаться и выходом из перераспределения тех станций, нагрузки которых достигли предельных значений в соответствии с (4). Изменение от шага к шагу станций, участвующих в перераспределении, означает изменение направления спуска к минимуму целевой функции.

Процесс перераспределения нагрузки между тепловыми станциями завершится, как только для всех пар станций, участвующих в распределении, будет выполнено условие

$$\left| \frac{b^t_i}{b^t_j} \frac{1 - \sigma^t_j}{1 - \sigma^t_i} - 1 \right| < \epsilon, \quad (8)$$

где  $\epsilon > 0$  — достаточно малое число.

Описанная вычислительная схема представляет собой метод покоординатного спуска, на каждом шаге которого выбирается такая координата, спуск по которой дает наибольшее уменьшение функции цели. Корректность такого подхода обусловлена выпуклостью функции цели и выполнением спуска в допустимой области по мощностям станций.

Из (8) следует, что для станций  $r = 1, 2, \dots, R$ , которые участвовали в процессе перераспределения нагрузки на последнем шаге, будет выполняться следующее соотношение:

$$\frac{b^t_r}{1 - \sigma^t_r} = \text{idem}, \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad R \leq n. \quad (9)$$

После выполнения процедуры перераспределения нагрузки между тепловыми станциями на указанных выше интервалах времени заканчивается первый этап решения.

Существенным моментом этого этапа является оптимальным образом проведенная загрузка тепловых станций при минимальной загрузке гидростанций на всех  $t \in T$ . Этот факт является необходимым условием для перехода ко второму этапу решения.

После выполнения (8) в процессе перераспределения нагрузки включаются гидростанции: одновременно на всех интервалах времени  $t$  периода  $T$  производится загрузка гидростанций [вплоть до выполнения ограничений (3)] с соответствующей разгрузкой тепловых станций.

По аналогии с первым этапом примем следующую стратегию перераспределения нагрузки между тепловыми станциями и гидростанциями. Будем разгружать такую тепловую станцию, на которой экономия топлива  $\Delta B^t_i$  максимальна. Соответственно будем загружать такую гидростанцию, для которой расход воды  $\Delta Q^t_i$  минимален. Таким образом, на каждую израсходованную единицу объема

воды будет в среднем сэкономлено

$$\frac{\Delta B^t_i}{\Delta Q^t_j} \quad (10)$$

единиц условного топлива.

Следует, однако, иметь в виду, что ценность единицы объема воды на разных ГЭС различна и во многом определяется двумя группами факторов — характеристиками относительных приростов и располагаемыми запасами воды. Это обстоятельство затрудняет процесс эффективного выбора ГЭС, подлежащей загрузке. Поэтому при распределении нагрузки с определением оптимального направления спуска требуется исключить влияние факторов одной из групп, т. е. поставить ГЭС в равные условия по одной из групп факторов.

Проще и целесообразнее уравнять шансы ГЭС по второй группе факторов. Это означает, что в каждый из моментов определения направления спуска к минимуму целевой функции необходимо иметь на ГЭС одинаковые запасы воды. Процедура выравнивания запасов воды на ГЭС лишена физического смысла, но вполне осуществима искусственно, опираясь на следующую теорему 1: изменение характеристик относительных приростов  $q^t_j(P)$  и заданного запаса воды  $Q^0_j$  гидростанции  $j$  в  $\mu > 0$  раз при прочих равных условиях не приводит к изменению вектора оптимальной мощности ГЭС

$$P^{\text{opt}} = \{P^1_j, P^2_j, \dots, P^t_j\} \quad (11)$$

по условиям оптимальной загрузки станций системы (доказательство теоремы дано в приложении).

На каждом шаге процесса загрузки ГЭС происходит уменьшение заданных на них первоначальных запасов воды. В результате происходит изменение (от шага к шагу) соотношения запасов воды на рассматриваемых ГЭС. Воспользуемся теоремой 1 для исключения влияния этого обстоятельства.

Пусть на  $r$ -м шаге процесса каждая ГЭС располагает

$$\delta Q^r_j = Q^0_j - Q^r_j \quad (12)$$

запасом, где  $Q^r_j$  — объем воды, израсходованный  $j$ -й ГЭС к  $r$ -му шагу. Выберем произвольно ГЭС, относительно которой будем искусственно выравнивать запасы воды на других ГЭС, и назовем ее базовой. Пусть это будет  $(n+1)$ -я гидростанция. Введем коэффициенты

$$\mu^r_j = \frac{\delta Q^r_{n+1}}{\delta Q^r_j}, \quad j = n+1, \dots, m, \quad (13)$$

которые будем называть коэффициентами приведения.

Умножим на эти коэффициенты соответствующие запасы воды (12), которыми располагают ГЭС к  $r$ -му шагу процесса:

$$\delta \bar{Q}^r_j = \mu^r_j \delta Q^r_j = \delta Q^r_{n+1}, \quad j = n+1, n+2, \dots, m. \quad (14)$$

Такое преобразование в силу принятого определения коэффициентов  $\mu^r_j$  приведет к выравниванию запасов воды на гидростанциях.

В соответствии с требованиями теоремы 1 умножим на эти же коэффициенты характеристики относительных приростов ГЭС. Тогда соотношение (10)

примет вид:

$$\frac{\Delta B^t_i}{\Delta \bar{Q}^t_j} = \frac{\Delta B^t_i}{\mu_j \Delta Q^t_j}, \quad i = 1, 2, \dots, j = n+1, n+2, \dots, m \quad (15)$$

или

$$\lim \frac{\Delta B^t_i}{\Delta \bar{Q}^t_j} = \frac{b^t_i}{q^t_j} \frac{1 - \sigma^t_j}{1 - \sigma^t_i} = \frac{b^t_i}{\mu_j q^t_j} \frac{1 - \sigma^t_j}{1 - \sigma^t_i}. \quad (16)$$

Таким образом, направление спуска к минимуму целевой функции будет определяться параметрами  $i, j, t$ , для которых величина выражения (16) достигает максимального значения. Перераспределение нагрузки в отличие от первого этапа осуществляется на всех интервалах времени  $t \in T$ , так как ограничения (3) заданы для всего периода времени  $T$ .

Процесс перераспределения нагрузки на втором этапе закончится как только будет выполняться соотношение

$$\delta Q^N_{n+1} < \xi, \quad (17)$$

где ( $\xi > 0$ ) — достаточно малое число;  $N$  — номер шага процесса. Можно показать (см. приложение), что при выполнении условия (17) запасы воды на остальных ГЭС будут удовлетворять соотношению

$$\delta Q^N_j < \frac{\xi}{\mu_j^N}, \quad (18)$$

т. е. на всех ГЭС в процессе разгрузки запасы воды будут исчерпаны в определенном смысле одновременно. Что касается значений коэффициентов  $\mu_j^N$ , то они, исходя из соотношения (16), ограничены снизу величиной

$$\mu_j^N > \frac{q^N_{n+1}}{q^N_j}. \quad (19)$$

Справедливость соотношений (17), (18) и (19) приводит к очень важному выводу: для гидростанций, участвующих в процессе распределения нагрузки, начиная с некоторого шага значения выражения (16) будут совпадать.

Таким образом, в конце процесса загрузки ГЭС будет справедливо равенство

$$\frac{b^t_\alpha}{\mu_\beta q^t_\beta} \frac{1 - \sigma^t_\beta}{1 - \sigma^t_\alpha} = \lambda; \quad (20)$$

$$\{\alpha\} \subset \{1, 2, \dots, n\};$$

$$\{\beta\} \subset \{n+1, \dots, m\},$$

где индексы  $\alpha, \beta$  относятся к станциям, участвующим в перераспределении нагрузки вплоть до окончания процесса.

Из (20) следует, что

$$\frac{b^t_\alpha}{1 - \sigma^t_\alpha} = \frac{\lambda \mu_\beta q^t_\beta}{1 - \sigma^t_\beta}; \quad (21)$$

$$\{\alpha\} \subset \{1, 2, \dots, n\};$$

$$\{\beta\} \subset \{n+1, \dots, m\}.$$

Обозначим

$$\lambda \mu_\beta = \lambda_\beta \quad (22)$$

и перепишем (21) в виде

$$\frac{b^t_\alpha}{1 - \sigma^t_\alpha} = \frac{\lambda_\beta q^t_\beta}{1 - \sigma^t_\beta}, \quad (23)$$

$$\{\alpha\} \subset \{1, 2, \dots, n\};$$

$$\{\beta\} \subset \{n+1, \dots, m\}.$$

В приведенных соотношениях коэффициент  $\lambda$  — мера эффективности использования единицы энергоресурса на базовой ГЭС при оптимальном распределении мощности в гидро-тепловой энергосистеме. Следует, однако, иметь в виду, что эта мера соответствует лишь тем интервалам времени, на которых базовая ГЭС участвует в перераспределении нагрузки вплоть до окончания процесса. Всем остальным интервалам времени соответствует либо меньшая, либо большая эффективность в зависимости от выхода базовой ГЭС на верхний или нижний пределы по нагрузке до окончания процесса перераспределения.

Коэффициенты  $\mu_\beta$  выражают меру эффективности использования единицы энергоресурсов на оставшихся ГЭС по сравнению с базовой ГЭС. Тогда коэффициенты  $\lambda_\beta$  для этих станций (аналогичные по смыслу коэффициенту  $\lambda$ ) можно вычислить, используя соотношение (22). Все рассуждения, приведенные выше относительно  $\lambda$ , справедливы и по отношению к коэффициентам  $\mu_\beta$ .

Второй этап перераспределения нагрузки между ТЭС и ГЭС закончится, как только заданные запасы воды на гидростанциях будут исчерпаны.

После первого этапа решения проверяются ограничения (5) по потокам мощности в контролируемых линиях. Потоки мощности рассчитываются по приближенной формуле

$$P^t_l = \Sigma a^t_{l_r} P^t_r + \Sigma a^t_{l_h} P^t_h + a^t_0, \quad (24)$$

где  $a^t_{l_r}$ ,  $a^t_{l_h}$ ,  $a^t_0$  — коэффициенты влияния;  $P^t_r$ ,  $P^t_h$  — активные мощности генераторных и нагрузочных узлов соответственно.

Полученные значения потоков мощности сравниваются с заданными предельными значениями. Если ограничения не нарушены, то осуществляется переход ко второму этапу решения. В противном случае производится дополнительное перераспределение нагрузки между станциями для введения режима в допустимую область.

Пусть в  $t$ -й интервале времени потоки мощности по группе линий  $L_1 \subset L$  превышают заданные предельные значения и величины отклонений по всем линиям составляют в сумме

$$\Delta P_{L_1} = \sum_{l \in L_1} |\Delta P_l|. \quad (25)$$

Вычислим эффективность от перераспределения нагрузки между станциями  $r, s \in \{1, \dots, n\}$  на уменьшение величины (25).

Разгрузим станцию  $r$  на величину  $\Delta P^t_r$ , сэкономив при этом  $\Delta B^t_r$  единиц условного топлива. Загрузим станцию  $s$  на величину  $|\Delta P^t_s|$ , допустив при этом пережог  $\Delta B^t_s$  единиц условного топлива.

Очевидно,

$$|\Delta B^t_s| > |\Delta B^t_r|, \quad (26)$$

поскольку, если отвлечься от выполнения ограничений (5), любое отклонение от оптимального решения приведет к пережогу.

Таким образом, в результате перераспределения нагрузки пережог составит

$$|\Delta B^t_s| \leftarrow |\Delta B^t_r| \quad (27)$$

единиц условного топлива.

Суммарная величина превышения предельных перетоков для нового распределения составит

$$\Delta P_{L_2} = \sum_{l \in L_2} |\Delta P_l|, \quad (28)$$

$$(L_2 \subset L).$$

Следовательно, уменьшению суммарного превышения перетоков по группе линий на единицу соответствует, в среднем, пережог

$$\gamma^t_{rs} = \frac{|\Delta B^t_s| - |\Delta B^t_r|}{\Delta P_{L_1} - \Delta P_{L_2}} \quad (29)$$

единиц условного топлива.

Поэтому представляется естественным придерживаться такой стратегии перераспределения нагрузки, при которой выбранной паре станций  $r, s$  соответствует наименьшее значение  $\gamma^t_{rs}$ .

Найдем предел отношения (29):

$$\lim \gamma^t_{rs} = \frac{b^t_s (1 - \sigma^t_r) - b^t_r (1 - \sigma^t_s)}{(1 - \sigma^t_s) \Sigma a^t_{l_r} - (1 - \sigma^t_r) \Sigma a^t_{l_s}}. \quad (30)$$

Выбор наименьшего значения выражения (30) является критерием определения пары станций, между которыми необходимо перераспределить нагрузку для уменьшения потоков мощности по контролируемым линиям до заданных предельных значений. Легко показать, что в этом случае минимум целевой функции будет достигаться в некоторой точке на границе области, в которой вследствие выбранной стратегии ограничения (5) будут обеспечены с наименьшими затратами.

Процесс перераспределения закончится либо после удовлетворения условиям ограничений (5), либо из-за невозможности их выполнения. В любом случае задача переходит в стадию перераспределения нагрузки между тепловыми и гидростанциями. В первую очередь перераспределение нагрузки осуществляется на всех тех интервалах времени, на которых имеет место нарушение ограничений (5).

Лишь после выполнения ограничений по перетокам на указанных интервалах времени или установления невозможности их удовлетворения (для всех или части перетоков) процесс перераспределения нагрузки распространяется на весь период  $T$ . При этом на каждом шаге процесса контролируются величины перетоков для удержания их в заданных пределах. С этой целью при определении направления спуска к минимуму целевой функции в соответствии с (16) в рассмотрении участвуют лишь такие станции, которые при изменении нагрузки не выводят величины перетоков в контролируемых линиях за допустимые значения. Множество таких станций достаточно просто определяется посредством коэффициентов влияния. В случае, если это множество пусто, выбирается такая пара станций, которая меньше всех остальных нарушает ограничения.

Описанная методика была проверена с помощью расчетов на ЦВМ для энергосистемы с 38 генераторами и 8 нагрузочными узлами при наличии двух крупных ГЭС. Расчеты показали безусловную и весьма быструю сходимость процесса вычисления, причем время расчета значительно меньше, чем при других известных методах.

**Приложение. Доказательство теоремы 1.** Вопреки утверждению теоремы 1 предположим противное: при работе ГЭС на характеристике относительных приростов  $q^t_j = \mu q^t_j$ , с запасом воды  $Q^0_j = \mu Q^0_j$ , при прочих равных условиях, вектор оптимальной мощности ГЭС

$$\bar{P}^{\text{опт}} = \{P^1_j, P^2_j, \dots, P^t_j\} \quad (\text{П-1})$$

отличается от соответствующего вектора (11).

В то же время вектор (П-1) удовлетворяет всем ограничениям исходной задачи и, следовательно, является для нее допустимым решением. Тогда соответствующие расходы условного топлива для решений с векторами (11) и (31) связаны соотношением

$$B \leq \bar{B}. \quad (\text{П-2})$$

С другой стороны, вектор (11) в силу тех же условий является допустимым решением задачи со скорректированными параметрами для  $j$ -й ГЭС и, следовательно,

$$B \geq \bar{B}. \quad (\text{П-3})$$

Из (П-2) и (П-3) следует, что  $B = \bar{B}$ , т. е. для обеих задач, имеющих одинаковые функции цели, оптимум совпадает и достигается в различных точках. Это противоречит

предположению, что функция цели унимодальна, т. е. теорема 1 доказана.

**Теорема 2.** Если на втором этапе описанного многошагового процесса перераспределения нагрузки к  $N$ -му шагу будет выполняться условие (17), то запасы воды на остальных ГЭС будут удовлетворять соотношению

$$\delta Q_j^N < \frac{\xi}{\mu_j^N}. \quad (\text{П-4})$$

Докажем это. Ввиду проводимого на каждом шаге процесса перераспределения нагрузки преобразования по искусственно выравниванию запасов воды на всех ГЭС на  $N$ -м шаге процесса, в силу (14), будет выполняться соотношение

$$\delta Q_{n+1}^N = \delta \bar{Q}_j^N. \quad (\text{П-5})$$

Тогда из выполнения условий (17) в соответствии с требованиями теоремы и соотношения (П-5) следует справедливость выражения (П-4).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горнштейн В. М. Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергетических системах. — М.: Госэнергоиздат, 1959.
2. Горнштейн В. М. Об определении наивыгоднейшего режима энергосистемы. — Электричество, 1964, № 6.
3. Горнштейн В. М. Условия оптимального режима энергосистемы при учете режимных ограничений с помощью штрафных функций. — Электричество, 1965, № 8.

[05.01.78]



УДК 621.316.925

## Селективная направленная защита гидрогенераторов от замыканий на землю

ПОПОВ И. Н., канд. техн. наук, СОКОЛОВА Г. В., инж.

Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского

В схемах блока генератор — трансформатор применяются неселективные защиты статора генератора от однофазных замыканий на землю. Эти защиты охватывают до 100% витков обмотки статора и действуют на стадии дуговых и металлических замыканий, предотвращая значительные разрушения изоляции и оплавление активной стали статора [Л. 1 и 2].

В связи с применением в нашей стране укрупненных блоков ГЭС с компенсацией тока замыкания на землю, в которых два и более гидрогенераторов (ГГ) работают на общую обмотку повышающего трансформатора, становится актуальным и требование селективности защиты. Это требование также учитывает фактор существенно более высокой удельной повреждаемости ГГ по сравнению с турбогенераторами за определенный срок наработки. Выполнение требования селективности способствует повышению бесперебойности энергоснабжения.

Из защит, обладающих селективностью действия в схемах укрупненных блоков, известны защиты от замыканий на землю с наложенными токами контроля [Л. 3]; однако выполнение этих защит затруднительно и приводит к дополнительным связям защитной аппаратуры с цепями высокого на-

пряжения. В [Л. 4] предложена защита, использующая переходные процессы, но она не получила применения.

В целях создания селективной и чувствительной защиты от замыканий на землю для генераторов укрупненных блоков ГЭС, не зависимой от режима заземления нейтрали, в статье рассмотрена возможность использования для действия защиты волновых переходных процессов, сопровождающих повреждения корпусной изоляции обмоток статора.

В соответствии с указанным принципом Энергетическим институтом им. Г. М. Кржижановского разработана защита, селективность действия которой основана на контроле направления распространения волн переходного процесса относительно главных выводов генератора. При этом использован опыт по разработке и внедрению направленных волновых (импульсных) защит от замыканий на землю электрических сетей [Л. 5]. В результате выполнены опытные образцы защиты, прошедшие испытания при искусственных замыканиях на землю в схемах укрупненных блоков ГЭС.

Характер повреждений корпусной изоляции [Л. 6—9] определяет следующие требования к защите. При частичных разрядах, как не опасных с точки зрения быстрого развития повреждения,

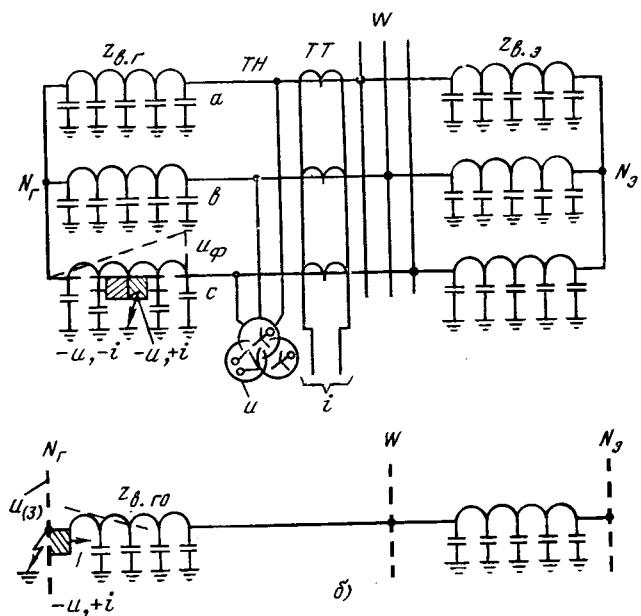


Рис. 1. Схемы замещения укрупненного блока ГЭС при однофазном замыкании на землю.  
 а — замыкание в точке  $x$ ; б — замыкание в нейтрали.

защита не должна действовать. Защита должна действовать при переходных процессах, возникающих при пробоях корпусной изоляции обмотки, на стадиях развития незавершенных пробоев, сопровождаемых сериями импульсов тока опасной величины с точки зрения перехода в полное дуговое или металлическое замыкание на землю и полных пробоев — дуговых или металлических замыканий на землю. Защита, выполняемая как импульсная, направленная с контролем тока перехода незавершенных пробоев в полный пробой, должна реагировать на знак мощности волны в контуре «фаза — земля» и контролировать волновые напряжения  $u(t)$  и токи  $i(t)$  при появлении в месте повреждения импульсов с параметрами: минимальные напряжение пробоя 350 В и токи 15—20 А, повторяющиеся каждый полупериод в течение 4—5 полупериодов промышленной частоты; фронты импульсов — от единиц микросекунд, длительности — от десятков микросекунд до нескольких миллисекунд.

Защита не должна срабатывать при возмущениях, не связанных с повреждением корпусной изоляции (поэтому необходим дополнительный контроль замыкания на землю в системе генераторного напряжения блока), иметь зоны нечувствительности (соответственно должны контролироваться повреждения у нейтрали, имеющей в нормальном режиме напряжение третьей и кратных трем гармоник, равное 3—4% номинального). Защита подключается измерительными цепями к измерительным трансформаторам, расположенным между выключателем и генератором, а цепями питания — к трансформатору напряжения блока.

Следует отметить, что контролируемые импульсные токи (15—20 А) выбираются по данным о критических токах, сопровождающих пробой изоляции. Однако имеющиеся исследования не дают еще более полных данных о диапазоне токов, контроль

которых был бы целесообразен в условиях эксплуатации.

**Переходный процесс при однофазном замыкании на землю.** Рассмотрим волновой переходный процесс при замыкании на землю обмотки статора ГГ в схеме укрупненного блока, замещаемой трехфазными цепями с распределенными эквивалентными параметрами (рис. 1). Определим фазные волновые напряжения и токи; при этом волновые со-противления обмоток  $z_{в.г}$  примем постоянными с аргументом, близким к нулю, что справедливо для определенного диапазона частот [Л. 10], в основном соответствующего спектральной плотности импульсов пробоя. Для ГГ различной мощности ( $S_f=30 \div 90 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ), применяемых в укрупненных блоках ГЭС,  $z_{в.г}$  соответственно принимает значения от 50 до 30 Ом [Л. 10 и 11]. Выбранная точка контроля у главных выводов генератора позволяет разделить зоны внутренних и внешних повреждений. Для оценки влияния места повреждения на характер процессов рассмотрим замыкание на землю в некоторой точке  $x$  обмотки статора и предельные случаи — у главных выводов и в нейтрали, а также внешнее замыкание.

При пробое изоляции на землю в системе генераторного напряжения блока происходит перераспределение напряжений вдоль обмоток генераторов и трансформаторов, сопровождаемое переходным процессом. В точке пробоя  $x$  (рис. 1,а) при  $t \geq 0$  имеем:

$$u_{3x} = u_{0x} + u_{Kx} = i_3 R_{\Pi}, \quad (1)$$

где  $u_{3x}$  — напряжение относительно земли в точке  $x$  после пробоя ( $t \geq 0$ );  $u_{0x} = aU_\Phi$  — напряжение в точке  $x$  обмотки при напряжении фазы  $U_\Phi$  на главных выводах в момент, предшествующий пробою, прием  $U_\Phi = \text{const}$ ;  $a$  — доля витков, отсчитываемых от нейтрали при замыкании в точке  $x$ ;  $-u_{kx} = (u_{0x} - u_{3x})$  — напряжение эквивалентного генератора, приложенное к обмотке в точке  $x$  в момент пробоя ( $t = 0$ ), определяющее переходный процесс;

$$i_3 = \frac{-u_{kx}}{\frac{z_{в,г}}{2}} = \frac{u_{0x}}{\frac{z_{в,г}}{2} + R_n} \quad \text{— переходный ток замыкания;}$$

$R_{\text{п}}$  — переходное сопротивление в месте замыкания; при  $R_{\text{п}}=0$   $-u_{3x}=0$ ;  $-u_{kx}=u_{0x}$ ;  $i_3=2 \frac{u_{0x}}{z_{\text{в.г}}}$ .

Рассматриваемая цепь неоднородна из-за различия волновых сопротивлений обмотки поврежденной фазы генератора  $z_{\text{в.г.}}$ , параллельно соединенных в нейтрали обмоток неповрежденных фаз  $z_{\text{в.г.}}/2$ , обмоток неповрежденных, параллельно работающих генераторов схемы блока  $z_{\text{в.в.}}$ . Волновые сопротивления трансформатора блока и дугогасящего реактора на порядок выше, поэтому не учитываются. Распространение волн от места повреждения в обоих направлениях ( $I$  и  $II$ ) рассматривается методом наложения: в точке замыкания осуществляется деление цепи, и к каждому образованному при этом входу  $I$  и  $II$  поочередно подключается эквивалентный источник напряжения  $u_{\text{кк.}}$

При замыкании в нейтрали генератора схема замещения видоизменяется и приводится к однофазной (рис. 1,б); предшествующее повреждению напряжение третьей и кратных трем гармоник

в этой точке при пробое формирует три фазные волны с одинаковыми знаками и уровнями  $u_{N\Gamma}(t)$ ,  $i_{N\Gamma}(t)$ , что образует систему падающих волн «фаза — земля». Поскольку все три волны в нейтрали схемы блока являются встречными, эквивалентная цепь в этой точке разомкнута; для условий движения волн по трем фазам  $z_{B,0} = (0,65 \pm 0,7)z_{B,\Gamma}$  [Л. 10 и 11].

Рассмотрение процессов в эквивалентных цепях целесообразно методом бегущих волн [Л. 12], позволяющим анализировать распространение элементарных волн в сложной неоднородной цепи и осуществлять их наложение для определения переходных  $u(t)$  и  $i(t)$  в различных точках цепи.

Для определения условий селективного контроля необходимо нахождение переходных  $u(t)$  и  $i(t)$  у главных выводов генератора  $W$ . С этой целью последовательно рассмотрим распространение возникших в месте повреждения волн по участкам для каждого из направлений  $I$  и  $II$  до точки контроля  $W$  с последующим наложением и суммированием величин  $u_{W\Gamma(I)}(t)$ ,  $i_{W\Gamma(I)}(t)$  по фазам и направлениям и определением результирующих величин  $u_W(t)$ ,  $i_W(t)$ ; при таком рассмотрении, выявляющем качественные признаки — знаки величин, а также диапазоны их изменений, затухание и переходное сопротивление  $R_{\Pi}$  не учитываются.

Напряжения и токи первых падающих волн на поврежденной фазе  $a$  на участках, примыкающих к месту повреждения, связаны выражениями:

$$-u_{kIIa} = i_{kIIa} z_{B,\Gamma}; \quad -u_{kI'a} = -i_{kI'a} z_{B,\Gamma}; \quad u_{kIIa} = u_{kI'a}.$$

При рассмотрении по участкам цепей  $I$  и  $II$  образуются отраженные и переломленные волны, приходящие по различным трактам в различные моменты времени к точке контроля и преломляемые в этой точке; волна  $u_{nW}$ ,  $i_{nW}$ , прошедшая по тракту  $n$  от места повреждения до точки контроля  $W$  и преломляемая в ней, представляется выражениями:

$$(u_{nW})_{I(H)a, b, c} = K_{nu} \vec{W}_{\Pi u} u_{kI(H)a}; \quad (2)$$

$$(i_{nW})_{I(H)a, b, c} = K_{ni} \vec{W}_{\Pi i} i_{kI(H)a}, \quad (3)$$

где  $K_{nu}$ ,  $K_{ni}$  — коэффициенты, определяемые перемножением коэффициентов отражения и преломления, соответствующих участкам тракта  $n$  цепи  $I$  или  $II$ ;  $\vec{W}_{\Pi u}$ ,  $\vec{W}_{\Pi i}$  — коэффициенты преломления по напряжению и току в точке  $W$  для различных направлений;  $\rightarrow$  — от обмоток поврежденного генератора к точке  $W$ ;  $\leftarrow$  — от схемы блока в точке  $W$ . В точке контроля  $W$  результирующие переходные напряжения и токи представляются выражениями:

$$u_{Wa, (b, c)}(t) = u_{W\Gamma a, (b, c)}(t) + u_{W\Gamma a, (b, c)}(t) = \\ = \sum_1^{n_I} [u_{nW\Gamma a, (b, c)}]_{\Delta t_{nI}} + \sum_1^{n_{II}} [u_{nW\Gamma a, (b, c)}]_{\Delta t_{nII}}; \quad (4)$$

Таблица

$t$	$u_W(t)$	$i_W(t)$
$t_0 = 0 \div \frac{0,33l}{v}$	0	0
$t_1 = \frac{0,33l \div l}{v}$	$u_{1a} = K_{1uI} \vec{W}_{\Pi u} u_I = 0,45$	$i_{1a} = K_{1iI} \vec{W}_{\Pi i} a_I = K_{1iI} \vec{W}_{\Pi i} \frac{a_I}{z_{B,\Gamma}} = 0,45$
$t_2 = \frac{l \div 1,66l}{v}$	$u_{2a} = u_{1a} + K_{2uI} \vec{W}_{\Pi u} a_I = 0,6$	$i_{2a} = i_{1a} + K_{2iI} \vec{W}_{\Pi i} a_I = 0,6$
$t_3 = \frac{1,66l \div 2,33l}{v}$	$u_{3a} = u_{2a} + K_{3uI} \vec{W}_{\Pi u} a_I = 0,65$	$i_{3a} = i_{2a} + K_{3iI} \vec{W}_{\Pi i} a_I = 0,65$
	$u_{3b(c)} = K_{1uII} \vec{W}_{\Pi u} a_{II} = 0,3$	$i_{3b(c)} = K_{1iII} \vec{W}_{\Pi i} a_{II} = 0,3$

$$i_{Wa, (b, c)}(t) = i_{W\Gamma a, (b, c)}(t) + i_{W\Gamma a, (b, c)}(t) = \\ = \sum_1^{n_I} [i_{nW\Gamma a, (b, c)}]_{\Delta t_{nI}} + \sum_1^{n_{II}} [i_{nW\Gamma a, (b, c)}]_{\Delta t_{nII}}, \quad (5)$$

где  $u_{W\Gamma}(t)$ ,  $i_{W\Gamma}(t)$ ,  $i_{W\Gamma a, (b, c)}(t)$  — переходные напряжения и токи каждой из цепей  $I$  и  $II$  в точке  $W$ , определяемые суммами величин по выражениям (2 и 3);  $n_I$ ,  $n_{II}$  — числа суммируемых волн соответствующих трактов каждой из цепей;  $\Delta t_{nI(II)}$  — интервал времени между приходом волн по трактам  $n_{I(II)}$  и  $(n+1)_{I(II)}$  к точке  $W$ .

Для определения  $u_{Wa, (b, c)}(t)$ ,  $i_{Wa, (b, c)}(t)$  по выражениям (4) и (5) методом сеток, использующим решения в форме бегущих волн, для цепей  $I$  и  $II$  строятся в осях  $x-t$  тракты волн, формируемых в результате распространения первой падающей волны от места повреждения до точки  $W$ . По тракту каждой волны находятся точки неоднородностей, для которых вычисляются коэффициенты отражений и преломлений, а следовательно, коэффициенты  $K_n$  и значения  $u_{nW}$ ,  $i_{nW}$ . При этом также определяются моменты времени прихода волны  $n$

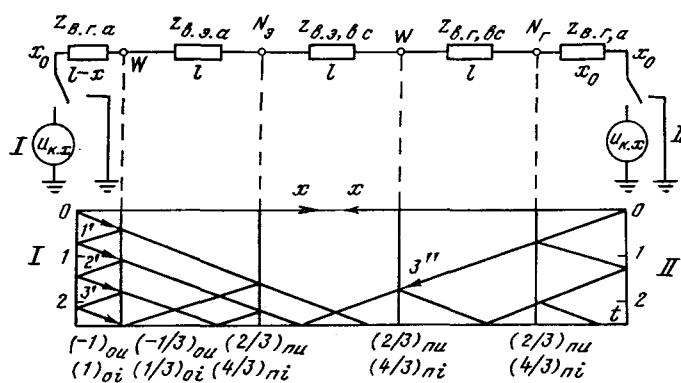


Рис. 2. Распространение волн переходного процесса по методу «сеток» при замыкании в точке  $x=0,66l$  обмотки статора генератора. В блок соединено три ГГ  $t=x/v$  ( $t=l/v=1$ ). Индексом « $\circ$ » обозначены коэффициенты отражения; индексом « $\prime$ » — преломления.

к точке контроля  $W$ . В результате наложения полученных  $n$  значений  $u_{nw}$ ,  $i_{nw}$  в различные моменты времени по фазам находятся  $u_{wi}(t)$ ,  $i_{wi}(t)$ ,  $u_{wII}(t)$ ,  $i_{wII}(t)$  и полные  $u_{wa(b,c)}(t)$ ,  $i_{wa(b,c)}(t)$ .

Пример построения сетки для начала процесса при замыкании обмотки в точке  $x_0=0,66l$  ( $l$  — длина обмотки) дан на рис. 2 и в таблице. Построение расчетных зависимостей  $u_w(t)$ ,  $i_w(t)$  при числе генераторов в блоке  $m_r=2 \div 3$ , в относительных единицах ( $u_{ki}=1$ ;  $i_{ki}=1$ ), позволяющих определить условия селективного контроля для целей защиты, показано на рис. 3.

При замыкании обмотки у главных выводов (рис. 3, а)  $u_{wa}=u_i=1$  — определяется напряжением падающей волны I-го направления и остается неизменным, так как все последующие волны, приходящие к точке  $W$  по фазе  $a$ , полностью отражаются от места повреждения с обратным знаком;  $i_{wa}(0)=i_i=\frac{u_i}{z_{b,3}}=1$ ;  $i_{wa}(t)$  сначала возрастает за счет отражений от места повреждения с положительным знаком, а затем уменьшается и изменяет

знак за счет прихода волн с токами обратного направления со стороны схемы блока;  $u_{wb(c)}=\frac{(2l \div 4l)}{v}$  определяется удвоением напряжений встречных преломленных в нейтралях волн;

$$\vec{N}_{\text{п.эи}} u_I = \vec{N}_{\text{п.ги}} u_{II},$$

$$\text{тогда } u_{wb(c)} \left( \frac{2l \div 4l}{v} \right) = (\vec{W}_{\text{п.и}} + \vec{W}_{\text{п.и}}) \vec{N}_{\text{п.эи}} u_I = \\ = \left( \frac{2z_r}{z_r + z_3} + \frac{2z_3}{z_r + z_3} \right) \vec{N}_{\text{п.эи}} u_I = 2 \vec{N}_{\text{п.эи}} u_I = 1,33,$$

где  $\vec{N}_{\text{п.эи}}$  и  $\vec{N}_{\text{п.ги}}$  — коэффициенты преломления в нейтралях схемы блока и генератора;  $v$  — скорость движения волны.

Следовательно, уровень  $u_{wb(c)}$  в данном случае не зависит от  $\vec{W}_{\text{п.и}}$ ;  $i_{wb(c)} \left( \frac{2l \div 4l}{v} \right) = 0$  из-за компенсации токов встречных волн, так как  $i_I = \frac{-u_I}{z_3}$ ,

$$i_{II} = \frac{u_{II}}{z_r}, \quad u_I = u_{II} \text{ и } \vec{N}_{\text{п.эи}} = \vec{N}_{\text{п.ги}}, \text{ то} \\ i_{wb(c)} \left( \frac{2l \div 4l}{v} \right) = - \vec{N}_{\text{п.эи}} \vec{W}_{\text{п.и}} i_I + \vec{N}_{\text{п.ги}} \vec{W}_{\text{п.и}} i_{II} = \\ = \left( - \frac{2z_3}{z_r + z_3} \frac{1}{z_3} + \frac{2z_r}{z_r + z_3} \frac{1}{z_r} \right) \vec{N}_{\text{п.эи}} u_I = 0,$$

т. е. условия компенсации не зависят от  $W_{\text{п.и}}$ ; при  $i_{wb(c)} \left( t > \frac{4l}{v} \right) = 0$  — условия компенсации токов в точке  $W$  сохраняются.

При внешнем замыкании у главных выводов (рис. 3, б) направление тока изменяется, а его величина определяется  $z_{b,r}$ , что при  $m_r > 2$  снижает его уровень относительно предыдущего случая.

При замыкании обмотки в точке  $x$  (рис. 3, в) напряжение  $u_{wa}(t)$  и ток  $i_{wa}(t)$  в результате приращений и периодических изменений через интервалы  $\frac{2(l-x)}{v}$ ,  $\frac{2l}{v}$  и кратные им, стремятся к единице, т. е. к уровню  $u_{wa}$  при замыкании у главных выводов; далее имеет место снижение  $u_{wa}$  и  $i_{wa}$ ;  $u_{wb(c)} \left[ \frac{(l+x) \div (3l+x)}{v} \right]$  за счет прихода встречных волн возрастает;  $i_{wb(c)} \left[ \frac{(l+x) \div (3l+x)}{v} \right]$  сначала возрастает, а затем снижается до 0 из-за наложения волн противоположного направления.

При замыкании у нейтрали (рис. 3, г) напряжение  $u_N(0)=0,05$  снижается при преломлении в точке  $W$  до  $u_{wa(b,c)} \left( \frac{l \div 3l}{v} \right) = \vec{W}_{\text{п.и}} 0,05 = 0,33$  и далее в интервале  $\frac{(3l \div 7l)}{v}$  возрастает до 0,09, что определяется отражением волн от нейтрали схемы блока, разомкнутой в схеме замещения. Последующее снижение до 0,02 происходит за счет отражений от замкнутой на землю нейтрали поврежденно-

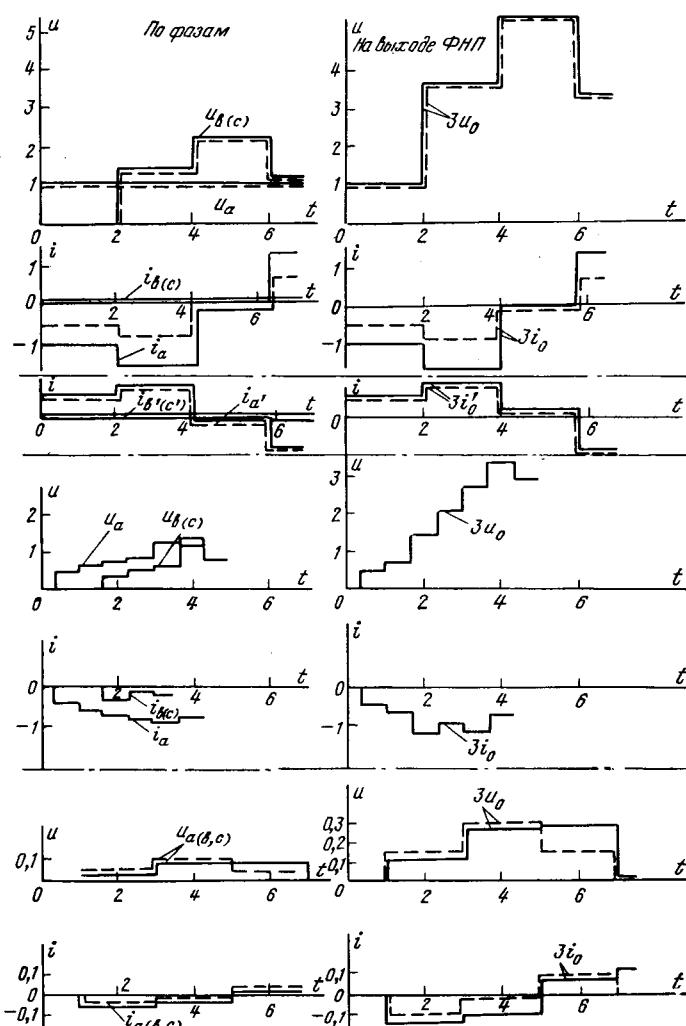


Рис. 3. Волновые процессы при замыкании на землю фазы  $a$  обмотки статора ГГ в схеме укрупненного блока. — в блоке три ГГ, — в блоке два ГГ.

го генератора; ток  $i_{wa(b,c)}$  после первого возрастания в интервале  $(l-3l)/v$  снижается за счет отражений от разомкнутой нейтрали блока до нуля и изменяет знак при  $5l/v$ .

Таким образом, замыкания на землю в обмотке и внешние замыкания наиболее полно и однозначно характеризуются начальной стадией переходного процесса  $(0-4l)/v \rightarrow 6l/v$  на поврежденной фазе. Знаки мощности волн при внутреннем и внешнем замыканиях противоположны. При этом процессы на неповрежденных фазах в указанных интервалах не вносят искажений знаков.

Учитывая сказанное, а также сравнительную сложность импульсных схем выбора поврежденной фазы будем осуществлять контроль с помощью фильтров нулевой последовательности ФНП. При этом суммирование фазных величин  $u_w(t)$ ,  $i_w(t)$  не искажает знаки, определяемые поврежденной фазой, а уровни в ряде случаев возрастают. Получаемое различие знаков мощности волн, приходящих к точке контроля при внутреннем и внешнем замыканиях, определяет выбор принципа селективной защиты, основанной на контроле направления распространения волн. Области изменения величин от минимальных (при замыкании у нейтрали) до максимальных (замыкание у главных выводов):  $3i_0 \approx 0,1-5,5$  отн. ед.;  $3i_0 \approx 0,11-1,7$  отн. ед.; длительности импульсов  $t_u$  в начальном интервале до изменения знаков при времени пробега  $t_p = l/v = 10-30$  мкс изменяются в пределах 60-200 мкс;  $t_i = 20-120$  мкс; собственные частоты токов при замыкании у главных выводов или у нейтрали  $f_0$ , определяемые пробегами волн между неоднородностями, расположенными на расстояниях  $l$ , изменяются в пределах от 3 до 10 кГц. При замыканиях в промежуточных точках имеют место колебания и более высоких частот, накладываемые на указанные частоты.

Таким образом, принятая схема замещения позволяет выявить диапазон частот при развитии волнового переходного процесса, амплитуды, длительности и формы первых сигналов  $u(t)$ ,  $i(t)$  до изменения их знаков и тем самым определить параметры электрических величин на входе измерительных трансформаторов и устройства защиты для различных точек повреждения обмотки и при изменении числа генераторов в схеме блока. Соотношение длины волны и электрической длины обмотки  $\lambda_{min}/4 = 1,5l$  показывает, что эти величины одного порядка и подтверждает волновой характер процесса. Полученные результаты согласуются с данными экспериментов при исследованиях переходных процессов в условиях замыканий на землю в ГГ (рис. 4, а и б).

Характерным для исследованных процессов является соответствие знаков мощности (сочетаний знаков  $u$  и  $i$ ) расположению места повреждения, наличие сглаженных фронтов  $u_w(t)$ ,  $i_w(t)$  за счет затухания колебаний повышенных частот.

**Условия срабатывания и выбор основных параметров защиты.** Анализ переходных процессов показывает, что фиксация знака мгновенной мощности должна осуществляться в первый полупериод изменений  $u(t)$ ,  $i(t)$  до перемены их знаков. Меньшие длительности и интервалы времени до измене-

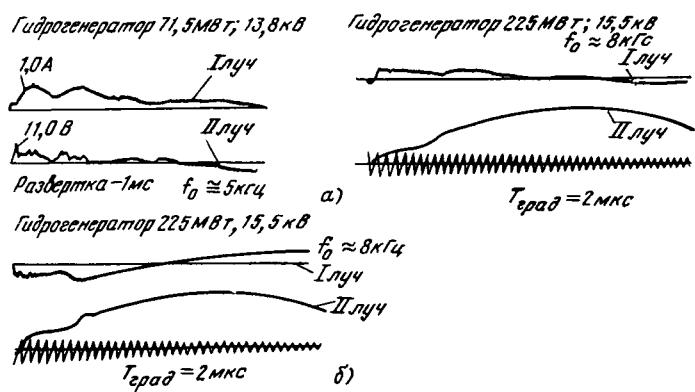


Рис. 4. Осциллограммы волнового переходного процесса на выходе ФТНП (I луч) и ФННП (II луч), установленных на главных выводах генератора при замыкании в зоне защиты (а) и вне зоны (б).

ния знаков имеют переходные токи и относятся к случаю замыкания у нейтрали при  $t_r=2$ , составляя  $\Delta t_i = 2 \frac{l}{v} = 2t_p$ . Соответственно определяется время фиксации  $t_{фикс} \leq 2t_p$ ; при  $t_p=10$  мкс,  $t_{фикс} \leq 20$  мкс. В реальных условиях за счет потерь фронтов и длительности первых импульсов после пробега от нейтрали к главным выводам растягиваются на 30-40 мкс [Л. 13], что позволяет несколько увеличить  $t_{фикс}$ .

На условия срабатывания оказывает влияние и достоверность передачи первичных процессов измерительными трансформаторами. Исследования [Л. 5] показали, что трансформаторы тока, имеющие относительно малое число витков, передают без существенных искажений импульсы токов с фронтами порядка нескольких микросекунд (частоты до сотен килогерц). Трансформаторы напряжения из-за влияния распределенных емкостей и индуктивностей обмоток такие фронты импульсов растягиваются до десятков микросекунд; при этом на фронте возможны кратковременные (микросекунды) импульсы обратного знака, но в остальном интервале искажения знака отсутствуют, поскольку в первичных импульсах преимущественно содержатся частоты ниже 10 кГц, передаваемые с малыми искажениями. Величины  $u(t)$ ,  $i(t)$  при замыкании в нейтрали, определяющие условия срабатывания, имеют сглаженные фронты и будут передаваться измерительными трансформаторами без существенных искажений.

При замыкании в других точках уровни и длительности  $u(t)$ ,  $i(t)$  возрастают, что повышает запас при срабатывании и уменьшает искажения при передаче основной части спектра. Однако крутизна фронтов импульсов также возрастает, что требует отстройки защиты от кратковременных измерений знака при передаче трансформатором напряжения фронта, т. е.  $10$  мкс  $\leq t_{фикс} \leq 20$  мкс. Таким образом, защита реагирует на переходные значения  $u(t)$ ,  $i(t)$ , формируемые при волновом процессе, сопровождающим однофазное замыкание на землю, и контролирует в первый полупериод изменения  $u$ ,  $i$  по знаку мгновенной мощности направление распространения преломленных волн в момент време-

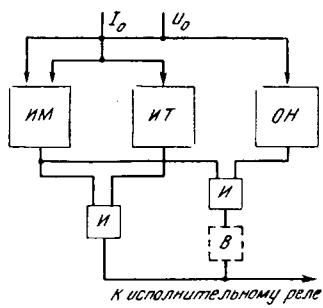


Рис. 5. Схема устройства защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора типа ИЗГ.

ни  $t_{\text{фикс}}$ , выбираемый по условиям селективности. При этом сочетания знаков при внутреннем и внешнем повреждениях будут различны в соответствии с направлением распространения волн от места повреждения. Уровни напряжений, предшествующих пробою изоляции, определяются распределением напряжения 50 Гц и высших (третьих) гармоник вдоль обмотки генератора.

Замыкание у нейтрали для гидрогенератора без расщепления обмотки статора принимаем за расчетный случай по условиям минимальных напряжений, предшествующих пробою; в соответствии с величиной  $U_{\min \text{ np}}=350$  В напряжения и токи волны в месте повреждения

$$u_{kn} = -U_{\min \text{ np}}; i_{kn} = \frac{u_{kn}}{z_{\text{в.г.о.}}}, \quad (6)$$

где  $z_{\text{в.г.о.}}=20 \div 40$  Ом для обмотки без параллельных ветвей, при наличии таковых  $z_{\text{в.г.о.}}$  изменяется обратно пропорционально числу параллельных ветвей  $a$ .

Соответствующие выражениям (6) первичные фазные напряжения и токи волны в точке контроля  $W$ :

$$u_{w1\phi} = \vec{W}_{\text{п}} u_{kn} e^{-\beta t_{\text{п}}}; i_{w1\phi} = \frac{1}{3} \vec{W}_{\text{п}} i_{kn} e^{-\beta t_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где

$$\vec{W}_{\text{п}} = \frac{2z_{\text{в.э.о.}}}{z_{\text{в.э.о.}} + z_{\text{в.г.о.}}} \text{ и } \vec{W}_{\text{п}} = \frac{2z_{\text{в.г.о.}}}{z_{\text{в.э.о.}} + z_{\text{в.г.о.}}}$$

— коэффициенты преломления по напряжению и току в точке  $W$ ;  $\beta$  — коэффициент затухания,  $\beta = 0,015 \div 0,03$  1/мкс.

В качестве расчетных условий принимаются:  $z_{\text{в.г.о. max}}=40$  Ом,  $a=1$ ,  $\beta=0,02$  1/мкс;  $t_{\text{п}}=15$  мкс. Число генераторов в схеме блока для определения чувствительности по напряжению  $m_{\text{г}}=4$ , по току —  $m_{\text{т}}=2$ .

Тогда при  $u_{kn}=350$  В,  $i_{kn}=26,2$  А. С учетом значений критического тока принимается  $i_{kn}=15 \div 20$  А, при этом  $u_{w1\phi}=130$  В;  $i_{w1\phi}=3,7 \div 5$  А.

Суммы фазных первичных величин, контролируемых ФНП,  $3u_{w1\phi}=-390$  В;  $3i_{w1\phi}=11,1 \div 15$  А.

Вторичные напряжения и токи волны в условиях срабатывания защиты определяются для включения через фильтры напряжения и тока ну-

левой последовательности ФНП и ФТНП при максимальных значениях коэффициентов трансформации трансформаторов напряжения  $K_U=270$  ( $U_{\text{н}}=15,75$  кВ) и тока  $K_t=800$  ( $S=50$  МВ·А,  $U_{\text{н}}=6,3$  кВ):  $u_{w2\text{cp}}=1,5$  В,  $i_{w2\text{cp}}=14 \div 19$  мА.

Для гидрогенераторов с расщеплением фазы статорной обмотки ( $a>1$ ;  $z_{\text{в.в.}}=az_{\text{в.г.о.}}$ ) выбор чувствительности защиты должен осуществляться на основе рассмотрения замыкания на землю вблизи нейтрали на одной из параллельных ветвей. При этом в расчетных условиях должно учитываться  $a_{\text{расч}}=a_{\text{max}}=4$ , что связано с необходимостью учета волн, приходящих от места замыкания в точку контроля по здоровым ветвям фазы. В этом случае

$$u_{w1\phi} = U_{\min \text{ np}} \left[ \left( 1 + \frac{2-a}{a} \right) + \left( 1 + \frac{2-3a}{3a} \right) \times \times (a-1) \right] W_{\text{шпрас}} e^{-0,3} = 260 \frac{2+a}{3a};$$

$$i_{w1\phi} = \frac{U_{\min \text{ np}}}{az_{\text{в.г.о.}}} \left[ \left( 1 - \frac{2-a}{a} \right) + \left( 1 - \frac{2-3a}{3a} \right) \times \times \frac{1}{3a-1} (a-1) \right] e^{-0,3} = \frac{17,5 (a-1)}{a^2}.$$

При  $a=4$   $u_{w1\phi}=130$  В;  $i_{w1\phi}=3,3$  А;  $u_{w2\text{cp}}=1,5$  В;  $i_{w2\text{cp}}=12,5$  мА. Следовательно, при  $a \neq 1$  требуемые  $u$ ,  $i$  при срабатывании близки к таковым для случая  $a=1$ .

Минимальная длительность импульсов и частотный диапазон, которые должны контролироваться импульсными органами защиты:  $\Delta t_{\min}=20$  мкс,  $\Delta f=2 \div 15$  кГц.

**Схема защиты.** Общая структурная схема (рис. 5) импульсной селективной защиты от замыканий на землю ГГ (ИЗГ) построена с применением следующих основных органов [Л. 14]: импульсного органа направления мощности  $IM$ ; импульсного органа тока  $IT$ ; органа напряжения  $OH$  с элементом времени  $B$ . Импульсный орган направления является основным органом защиты, обеспечивающим ее селективность посредством контроля у главных выводов генератора знака мощности в первом полупериоде переходного процесса в контуре «фаза — земля»; действует при замыканиях во всех точках обмотки статора защищаемого генератора.

Импульсный орган тока и орган напряжения с элементом времени  $B$  контролируют признаки, характерные для повреждений, и при их появлении и выборе поврежденного генератора органом направления — разрешают посредством схем  $I$  действие защиты на выходные цепи; применение таких органов предотвращает срабатывание защиты при возможных коммутационных процессах и разрядах в изоляции в защищаемой зоне, не связанных с повреждениями.

Импульсный орган тока реагирует на появление импульсов тока опасной величины (около 15 А) при незавершенных пробоях и дуговых замыканиях в любой точке обмотки статора защищаемого генератора и при отсчете числа серий импульсов пробоя (4  $\div$  5), характерных для данной стадии поврежде-

ния, подготавливает действие защиты на выходные цепи. При этом может быть предусмотрена регистрация числа срабатываний органа ИТ, что позволит на основе опытной эксплуатации при различных уставках накопить статистические данные по величинам токов и временам развития повреждения и уточнить условия перехода незавершенного пробоя в полный или условия временного восстановления изоляции.

Орган напряжения (общий для всех защит ИЗГ блока) реагирует на появление напряжения  $3U_0$  промышленной частоты и на знак производной напряжения третьей и кратных трем гармоник [Л. 2] и разрешает действие защиты при устойчивых замыканиях на землю. Такой комбинированный контроль обеспечивает в целом при замыкании в любой точке, включая нейтраль, а также от однократных разрядов в изоляции в зоне при применении элемента задержку  $0,5 \div 2$  с.

Защита ИЗГ не требует повышения порогов срабатывания и увеличения выдержек времени для отстройки при замыканиях на землю в сети высокого напряжения, а также — от коммутационных процессов в схеме блока, так как импульсный орган направления не реагирует на эти повреждения и процессы, поскольку они являются внешними.

Функциональная схема защиты и ее органов приведена на рис. 6. Орган *ИМ* содержит следующие элементы: промежуточные трансформаторы *Тр1* и *Тр2*, согласующие цепи входа защиты с цепями *ФТНП* и *ФННП* и разделяющие эти цепи; частотные многозвенные *LC*—фильтры с полосой пропускания 2–15 кГц, выделяющие составляющие тока и напряжения волнового переходного процесса; двухтактные усилители *У1* и *У2*, повышающие уровни сигналов на входе фазочувствительной схемы с целью более точной ее работы; кольцевую симметричную фазочувствительную схему  $\phi$ , осуществляющую контроль знака мощности на входе; исполнительный одновибратор *Ов1* и основной блокирующий одновибратор *Ов2*, взаимоблокирующие друг друга (операции запрета *Зп1* и *Зп2*); одновибратор *Ов1* при своем срабатывании подготавливает цепи выхода защиты, контролируемые органами *ИТ* и *ОН* (операции *И1* и *И2*); элемент *К1* дополнительной блокировки, запускаемый органом *Н1* (реле типа *ЗЗГ–2*), обеспечивающий после фиксации одновибраторами *Ов1* или *Ов2* начального знака мощности блокировку одновибратора *Ов1* и защиты в целом до устранения замыкания на землю (операции *ИЛИ 1* и запрета *Зп 1*).

Действие защиты на цепь реле *P1* осуществляется при циклическом срабатывании одновибратора *Ов3* органа *ИТ* и накоплении 4—5 серий импульсов в условиях одновременного срабатывания одно-

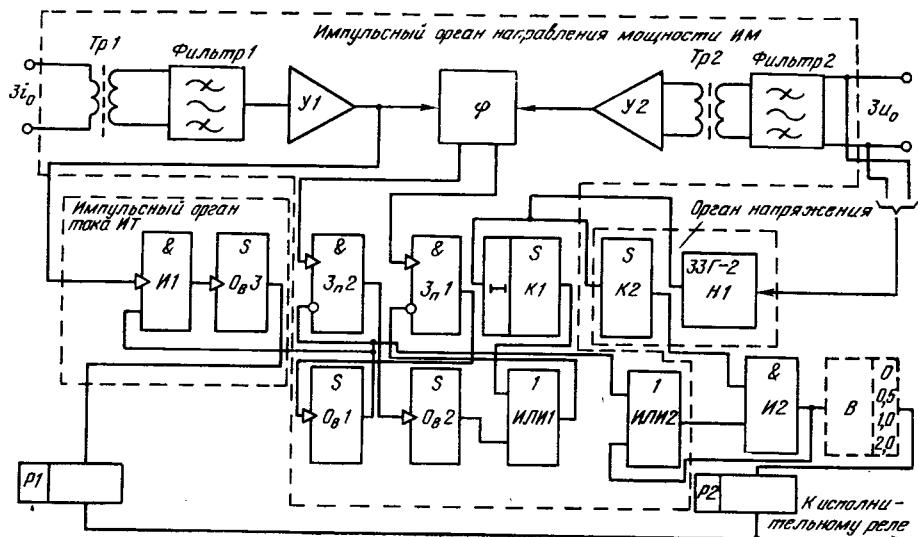


Рис. 6. Функциональная схема защиты ИЗГ и ее органов.

вибратора  $Ov1$  органа  $IM$  (операция  $I1$ ). Действие защиты на цепь реле  $P2$  через  $B$  происходит при срабатывании одновибратора  $Ov1$  и элемента  $K2$ , пускаемого от измерительного элемента  $H1$  органа  $OH$ , (операция  $I2$ ). Схема включения элемента  $ИЛИ2$  обеспечивает запоминание действия защиты на реле  $P2$  до ликвидации устойчивого повреждения. Возврат элементов защиты после ликвидации режима повреждения — мгновенный.

Проверка защиты ИЗГ производилась при искусственных замыканиях на землю и в условиях опытной эксплуатации на генераторах СВ 1340/750—96; 71,5 МВ·А, 13,8 кВ и СВО 733/130—36; 45,6 МВ·А; 10,5 кВ укрупненных блоков Киевской ГАЭС и Кременчугской ГЭС.

Испытания защиты сопровождались измерениями на генераторах блоков при режимах: помех в цепях питания защиты, не связанных с повреждениями; уровней напряжений третьей гармоники на главных выводах и в нейтрали с точки зрения их использования для повышения чувствительности.

Измерения и испытания в нормальных режимах нагрузки генератора и в режиме холостого хода показали, что защита надежно отстроена по частотному спектру от небалансов в цепях *ФНП*. В наиболее тяжелом случае коммутации — самосинхронизации с соседним генератором блока, сопровождаемом переходным процессом, наблюдалось правильное действие органа *ИМ* защиты на блокировку, как реакция на внешнее возмущение. Амплитуды напряжений третьих гармоник в нейтрали при нормальном режиме генератора соответствуют уровням минимальных пробивных напряжений и выше (от 350 В до 1400 В). Диапазон изменения относительной величины третьей гармоники напряжения на главных выводах исследуемых ГГ в режиме нагрузки и без нее — от 1,6 до 3.

Основные характеристики защиты ИЗГ — селективность и чувствительность — проверены при искусственных замыканиях на землю ГГ в схеме укрупненного блока ГЭС, имеющего три генератора. Поведение защиты при 11 опытах замыканий на главных выводах ГГ (в зоне защиты и внешних) было

правильным. Правильное действие импульсного органа мощности ИМ в пяти опытах замыканий у нейтрали подтвердило возможность фиксации этим органом замыканий по всей обмотке статора.

Опытная эксплуатация в течение четырех лет четырех комплектов защиты ИЗГ, подключенных к измерительным трансформаторам, показала ее помехоустойчивость. Этот опыт подтвердил надежность несрабатывания защиты в нормальных эксплуатационных режимах ГЭС при различного рода коммутациях, а также при внешних замыканиях на землю и коротких замыканиях, включая однофазные и междуфазовые на стороне высшего напряжения трансформатора блока.

Таким образом, информация, получаемая при контроле переходного процесса в условиях повреждения корпусной изоляции гидрогенератора — при развитии незавершенных пробоев и полных пробоях — может быть использована для осуществления селективной защиты генераторов в схемах укрупненных блоков ГЭС, реагирующей на направление распространения волн, возникающих в месте повреждения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А. М. Релейная защита. — М.: Энергия, 1976.
2. Кискачи В. М. Защита генераторов энергоблоков от замыканий на землю в обмотке статора. — Электричество, 1975, № 11.

3. Вайнштейн Р. А., Шмойлов А. В. О 100%-ной защите синхронных генераторов от однофазных замыканий на землю. — Изв. Томского политехнич. ин-та, 1969, вып. 179.

4. Маранчак В. М. Защита гидрогенераторов, работающих в блоке, от замыканий на землю. — Электричество, 1955, № 11.

5. Попов И. Н., Соколова Г. В., Махнев В. И. Импульсная направленная защита электрических сетей от замыканий на землю типа ИЗС. — Электрические станции, 1978, № 4.

6. Козырев И. А. Изоляция электрических машин и методы ее испытания. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1962.

7. Ионизационное старение, короностойкость и методы испытаний высоковольтной изоляции. — М.: Изд. ЦИНТИ, 1963.

8. Кулаковский В. Б. Исследование незавершенных пробоев в изоляции генераторов. — Электротехника, 1968, № 9.

9. Тихобаев В. Г. Исследование волновых процессов в обмотках статоров генераторов при повреждении корпусной изоляции: Автореф. дис. на соиск. учен. степени к-та техн. наук. Томск, 1975. В надзаг.: М-во высш. и средн. спец. образования РСФСР, Томский политехнический ин-т.

10. Частотные характеристики обмоток мощных гидрогенераторов/ Горбунов Ю. К., Каганов З. Г., Смирнов Ю. Р., Тырин В. М. — Изв. вузов. Электромеханика, 1969, № 3.

11. Люлько В. А. Волновые параметры турбогенераторов. — Электричество, 1960, № 9.

12. Канторович М. И. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. — М.: ГИИТЛ, 1955.

13. Каганов З. Г. Уравнения волновых процессов при замыканиях на землю в электрических машинах. — Электричество, 1969, № 12.

14. А. с. № 274197 (СССР). Устройство для защиты генератора/ Вишняков Р. Д., Каганов З. Г., Попов И. Н., Соколова Г. В., Тырин В. М. — Опубл. в Б. И., 1970, № 21.

[20.03.80]



#### Магазин № 16 «Техническая книга» г. Куйбышева

#### ПРЕДЛАГАЕТ

#### книгу издательства «Энергия»

Захаров В. Н., Поспелов Д. А., Хазацкий В. Е. Системы управления: Задание. Проектирование. Реализация. — 2-е, перераб. и доп. издание. — 1977. — 424 с., ил. — 2 р. 50 к.

Обсуждаются проблемы, возникающие при проектировании систем управления промышленными объектами. Описаны основные этапы проектирования от составления задания на разработку до оценки качества реализованной системы. Во второе издание добавлен материал по специальному языку задания работы автоматических систем, близкого по форме к языку технолого, методам управления сложными объектами на базе языка, близкого к естественному, а также внутреннему математическому обеспечению для управляющих вычислительных машин.

Книга предназначена для инженеров-проектировщиков автоматизированных систем управления крупных промышленных объектов.

Адрес магазина: 443000 г. Куйбышев, обл., Красноармейская, 62. Облкниготорг.

Книгу можно приобрести наложенным платежом

# Сообщения

УДК 621.311.018.782.3.001.24

## О движении центра инерции электрической системы

ЛУКАШОВ Э. С., доктор техн. наук  
СибНИИЭ

При исследовании электромеханических переходных процессов электроэнергетических систем значительный интерес может представлять информация о движении центра инерции системы, характеризующая поведение всей электроэнергетической системы как единого физического объекта. Понятие центра инерции аналогично понятию центра тяжести системы материальных тел, но отнесенное к вращательному движению. При позиционной идеализации электроэнергетической системы, когда вся электрическая схема системы, включая нагрузку, электрическую сеть и сопротивления генераторов, замещается пассивным многополюсником, электромеханические переходные процессы системы описываются следующими уравнениями:

$$J_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d \delta_i}{dt} = P_{ti} - P_{\text{эм}}; \quad (1)$$

$$P_{\text{эм}} = E^2 i g_i + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [E_j b_{ij} \sin \delta_{ij} + g_{ij} (E_i - E_j \cos \delta_{ij})]; \quad (2)$$
$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где  $n$  — число генераторов в системе;  $J_i$  и  $D_i$  — постоянные времена механической инерции ротора и демпфирования  $i$ -го генератора;  $P_t$  — момент (мощность) турбины;  $P_{\text{эм}}$  — момент (мощность) электромагнитных сил, приложенных к ротору генератора;  $\delta_i$  — абсолютный угол, определяющий положение в пространстве ротора  $i$ -го генератора относительно некоторой произвольно выбранной оси, врачающейся с синхронной скоростью;  $b_{ij}$  — взаимный угол между э. д. с.  $i$ -го и  $j$ -го генераторов;  $E$  — э. д. с. генератора;  $g_i$ ,  $b_i$  — активная и реактивная взаимные проводимости между узлами  $i$  и  $j$  многополюсника, замещающего схему системы;  $g_i$  — активная проводимость, подключенная непосредственно к  $i$ -му присоединению многополюсника. При этом положение центра инерции (координата  $\delta_0$ ) определяется следующим образом:

$$\delta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n J_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n J_i}. \quad (4)$$

В некоторых случаях оказывается возможным выделить движение центра инерции системы и рассматривать сложный электромеханический переходный процесс как результат наложения движения центра инерции системы и движения каждого генератора относительно центра инерции системы. Впервые этот прием был использован А. А. Горевым, именовавшим движение центра инерции средним взвешенным движением системы.

Рассмотрим малые колебания электрической системы, включающей шины бесконечной мощности и группу из  $n$  одинаковых синхронных генераторов (возможно, с местной нагрузкой), подключаемых к шинам через некоторое активно-индуктивное сопротивление и одинаково нагруженных. При этом положение центра инерции рассматриваемой группы генераторов

$$\delta_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i, \quad (5)$$

а координата  $k$ -го генератора относительно центра инерции

$$\delta_{k0} = \delta_k - \delta_0 = \delta_k - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i. \quad (6)$$

Система уравнений малых колебаний согласно (1)–(3) при отсутствии механического демпфирования

$$J p^2 \Delta \delta_i + S_0 \Delta \delta_i + S \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Delta \delta_j = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

где

$$S_0 = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}; \quad S = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Складываем уравнения (7) и с учетом того, что

$$\sum_{i=1}^n S \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Delta \delta_j = S(n-1) \Delta \delta_1 + S(n-1) \Delta \delta_2 + \dots + S(n-1) \Delta \delta_n = \\ = S(n-1) \sum_{i=1}^n \Delta \delta_i,$$

получаем

$$n J p^2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta \delta_i + S_0 \sum_{i=1}^n \Delta \delta_i + (n-1) S \sum_{i=1}^n \Delta \delta_i = 0.$$

Окончательно

$$n J p^2 \Delta \delta_{k0} + n [S_0 + (n-1) S] \Delta \delta_0 = 0.$$

Характеристическое уравнение, описывающее свободное движение центра инерции системы,

$$J p^2 + [S_0 + (n-1) S] = 0. \quad (8)$$

Получим характеристическое уравнение, описывающее движение  $k$ -й машины относительно центра инерции. Для этого из уравнения движения  $k$ -й машины

$$J p^2 \Delta \delta_k + S_0 \Delta \delta_k + S \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \Delta \delta_j = 0$$

вычтем уравнение движения центра инерции

$$J p^2 \Delta \delta_0 + [S_0 + (n-1) S] \Delta \delta_0 = 0.$$

В результате имеем

$$J p^2 (\Delta \delta_k - \Delta \delta_0) + S_0 \Delta \delta_k + S \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \Delta \delta_j - \\ - [S_0 + (n-1) S] \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta \delta_i = 0$$

или после преобразований

$$J p^2 \Delta \delta_{k0} + (S_0 - S) \Delta \delta_{k0} = 0.$$

Характеристическое уравнение любой из машин системы, описывающее ее движение относительно центра инерции,

$$Jp^2 + S_0 - S = 0. \quad (9)$$

Симметрия в исходной схеме позволяет и общее характеристическое уравнение системы получить в компактном виде. Характеристический определитель  $\Delta_n$  системы (7) имеет одинаковые элементы по главной диагонали. Все остальные элементы также равны между собой. Таким образом, задача получения характеристического уравнения для рассматриваемого случая сводится к получению выражения для определителя порядка  $n$  вида

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a & b & b & \dots & b \\ b & a & b & \dots & b \\ b & b & a & \dots & b \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b & b & b & \dots & a \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Раскрывая (10) по первой строке, используя особенности миноров, получаем

$$\Delta_n = a\Delta_{n-1} - b^2(n-1)(a-b)^{n-2}. \quad (11)$$

Прибавляя к первому элементу первой строки (10)  $b-b$  и раскладывая после этого  $\Delta_n$  на сумму двух определителей, получаем

$$\Delta_n = (a-b)(\Delta_{n-1} + b(a-b)^{n-1}). \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) представляют собой систему двух уравнений с двумя неизвестными  $\Delta_n$  и  $\Delta_{n-1}$ , откуда

$$\Delta_n = (a-b)^{n-1} [a + (n-1)b]. \quad (13)$$

Так как в рассматриваемом случае

$$a = Jp^2 + S_0; \quad b = S,$$

то искомое характеристическое уравнение системы

$$(Jp^2 + S_0 - S)^{n-1} [Jp^2 + S_0 + (n-1)S] = 0 \quad (14)$$

составляется из произведения характеристического полинома, описывающего движение центра инерции и характеристического полинома, описывающего движение отдельной машины относительно центра инерции (в степени  $n-1$ ).

Таким образом, в рассматриваемой электрической системе движение центра инерции машин совершенно не зависит от взаимного движения между машинами. Это дает возможность рассматривать отдельно условия статической устойчивости центра инерции и индивидуального движения каждой машины. Можно предположить, что при изменении режима работы генераторов устойчивость этих двух видов движения нарушается неодновременно. Исследование устойчивости каждого движения в отдельности и сравнение полученных результатов позволит дать рекомендации по исследованию реальных схем дальних электропередач от удаленных многоагрегатных электрических станций.

Выражения (8) и (9) по общей форме аналогичны характеристическому уравнению генератора, включенного на шину бесконечной мощности. Это дает возможность говорить о синхронизирующей мощности движения центра инерции группы синхронных машин и о синхронизирующей мощности каждой машины относительно центра инерции. Согласно (2) и (3)

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j b_{ij} \cos \delta_{ij} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j g_{ij} \sin \delta_{ij}; \quad (15)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -E_i E_j b_{ij} \cos \delta_{ij} - E_i E_j g_{ij} \sin \delta_{ij}. \quad (16)$$

Пусть напряжение на шинах бесконечной мощности равно  $E_0$ , а э. д. с. всех генераторов равна  $E$ . Обозначим также:  $\theta$  — угол между  $E_0$  и  $E$  в исходном установившемся режиме;  $g_0$ ;  $b_0$  — активную и реактивную проводимости между узлом присоединения э. д. с. генератора и шинами бесконечной мощности;  $b$  — реактивную проводимость между генераторами.

Тогда

$$S_0 = E E_0 (b_0 \cos \theta + g_0 \sin \theta) + E^2 b (n-1); \quad (17)$$

$$S = -E^2 b. \quad (18)$$

Синхронизирующая мощность центра инерции генераторов, которую можно рассматривать как синхронизирующую мощность эквивалентного генератора

$$S_a = S_0 + (n-1)S = E E_0 (b_0 \cos \theta + g_0 \sin \theta). \quad (19)$$

Синхронизирующая мощность каждого из генераторов группы относительно общего центра инерции

$$S_{0t} = S_0 - S = E E_0 (b_0 \cos \theta + g_0 \sin \theta) + n E^2 b. \quad (20)$$

Сравнивая (19) и (20), убеждаемся, что взаимное движение более устойчиво, чем движение центра инерции. Действительно, в нашем случае  $S_a > 0$  в том же диапазоне угла  $\theta$ , как и у одиночного генератора, работающего на шину бесконечной мощности, т. е. до  $\theta_{kp}$ , которое при реальных соотношениях между  $g_0$  и  $b_0$  несколько превышает  $90^\circ$ . Величина  $S_{0t}$  превышает  $S_a$  на весьма значительную существенно положительную величину (если  $b > 0$ ). При увеличении мощности, вырабатываемой генераторами, угол  $\theta$  увеличивается, и к моменту обращения в нуль свободного члена характеристического уравнения эквивалентного генератора  $S_{0t}$  все еще будет положителен. Таким образом, при исследовании апериодической устойчивости многоагрегатных электрических станций с одинаковыми генераторами допустимо замещать станцию одним эквивалентным генератором, а взаимное движение не учитывать, как заведомо устойчивое в пределах устойчивости эквивалентного генератора.

Не зависящая от режима работы генераторов постоянная составляющая в выражении (20) для синхронизирующей мощности относительного движения генератора имеет очевидный физический смысл. Согласно (15) синхронизирующая мощность каждого генератора есть сумма синхронизирующих мощностей относительно всех узлов схемы. По условию взаимные углы между генераторами при любой нагрузке равны нулю. Поэтому синхронизирующая мощность между генераторами от их режима не зависит и при увеличении нагрузки сохраняет свое максимальное значение.

Каким образом изменится вывод о допустимости исследования апериодической устойчивости эквивалентного генератора вместо группы однотипных одинаково нагруженных машин при наличии АРВ генераторов? Регулирование возбуждения по углу или напряжению генераторов лишь увеличивает синхронизирующую мощность. В несколько ином отношении находится регулирование по току статора. Если АРВ по углу и напряжению осуществляют отрицательную обратную связь (например, при увеличении угла регулирование увеличивает э. д. с. и тем самым способствует уменьшению угла), то регулирование по току статора является положительной обратной связью. При этом существует предельное по устойчивости значение коэффициента регулирования, в простейшей схеме «генератор — шины» пропорциональное сопротивлению генератора. В рассматриваемой схеме взаимное сопротивление  $b$  может быть меньше  $b_0$ ; поэтому теоретически возможен случай, когда нарушается устойчивость регулирования возбуждения и взаимное движение становится неустойчивым при устойчивом движении центра инерции системы. Однако это может иметь место лишь при весьма высоких значениях  $K_1$ ; благодаря применяемым обычно мерам (ограничение величины  $K_1$ , групповое регулирование и др.) вышеописанное обстоятельство можно в расчет не принимать и считать возможным и при наличии АРВ группу синхронных машин для расчета апериодической устойчивости замещать эквивалентным генератором. Более подробно вопросы АРВ генераторов многомашинной станции, в том числе и в условиях симметрии, рассмотрены в специальной литературе [Л. 1—3]. Следует добавить, что относительное движение генератора в рассматриваемом случае более устойчиво по сравнению со схемой, в которой э. д. с. всех других генераторов имеют постоянный угол, т. е. во всех других узлах схема присоединена к шинам бесконечной мощности. В последнем случае синхронизирующая мощность равна  $S_0$ , т. е. на  $E^2 b$  меньше синхронизирующей мощности относительного движения.

Используем полученные результаты для исследования более общего случая электрической системы без шин бесконечной мощности. Когда связь с системой отсутствует, то  $b_0 = 0$ ;  $g_0 = 0$  и характеристическое уравнение (14) преобразуется к виду:

$$Jp^2 (Jp^2 + S_0 - S)^{n-1} = 0, \quad (21)$$

где свободное движение центра инерции системы описывается уравнением

$$Jp^2 \Delta \delta_0 = 0 \quad (22)$$

или при наличии демпфирования

$$p(Jp + D) \Delta \delta_0 = 0. \quad (23)$$

Уравнению (22) удовлетворяет любое равномерное движение центра инерции (ускорение центра инерции равно нулю). Уравнение (23) указывает на то, что свободное движение центра инерции системы характеризуется одним нулевым и одним существенно отрицательным корнем. Решение (23) есть

сумма произвольной постоянной величины и затухающей экспоненты. Если в первом случае при некоторых заданных условиях (положении и скорости центра инерции системы) центр инерции согласно (22) будет продолжать двигаться с заданной скоростью бесконечно долго, то во втором случае начальная скорость центра инерции будет затухать с постоянной времени, равной отношению  $J/D$ .

Можно предположить, что указанное свойство характерно не только для электрических систем, составленных из одинаковых генераторов в симметричной схеме. Рассмотрим более общий случай —  $n$  произвольных машин в произвольной схеме без потерь при произвольной нагрузке ( $g_i \neq 0$ ). Уравнения малых колебаний системы в этом случае

$$J_i p^2 \Delta \delta_i + S_{0i} \Delta \delta_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n S_{ij} \Delta \delta_j = 0 \quad (24)$$

или в матричном виде

$$[p^2 I + S] \Delta \delta = 0, \quad (25)$$

где  $I$  — квадратная матрица порядка  $n$ , у которой элементы по главной диагонали равны постоянным механической инерции машин, а все другие — нулевые;  $\Delta \delta$  — матрица-столбец неизвестных углов;  $S$  — квадратная матрица порядка  $n$  частных производных мощности по углу. В матрице  $S$  по главной диагонали [согласно (15) и (16)] расположены элементы

$$S_{0i} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j b_{ij} \cos \delta_{ij}, \quad (26)$$

а все другие элементы:

$$S_{ij} = -E_i E_j b_{ij} \cos \delta_{ij}. \quad (27)$$

Определим сумму элементов какого-либо столбца матрицы  $S$ . Элемент на главной диагонали есть сумма  $n-1$  слагаемых, остальные элементы столбца в сумме дают ту же самую величину только с обратным знаком. Таким образом, для системы, схема которой составлена только из реактивных сопротивлений, сумма элементов любого столбца матрицы  $S$  равна нулю.

Определим свободное движение центра инерции системы в этом общем случае. Складываем между собой все уравнения (24) и учтем, что сумма всех вторых членов равна нулю, сумма третьих членов равна нулю и т. д. В результате, с учетом (4)

$$p^2 \sum_{i=1}^n J_i \Delta \delta_i = 0, \quad (28)$$

т. е. центр инерции движется как свободное материальное тело с постоянной механической инерции, равной сумме постоянных всех генераторов системы.

Если имеется демпфирование, то подобная операция выделения уравнения движения центра инерции оказывается возможной только при условии пропорциональности  $J_i$  и  $D_i$ . При этом уравнение движения аналогично (23). Если в схеме системы имеются активные проводимости между узлами, то сумма элементов матрицы  $S$  не равна нулю. Вторая сумма (15) в диагональном элементе, состоящая из  $n-1$  слагаемых, и сумма добавок в остальные элементы столбца равны между собой и по величине, и по знаку; поэтому при суммировании не уничтожаются. Таким образом, выделение движения центра инерции возможно только для консервативной электрической системы при отсутствии активных элементов в ее электрической схеме.

В заключение рассмотрим самый общий случай определения движения центра инерции системы, описываемой уравнениями (1) — (3) при отсутствии демпфирования, но с учетом активных проводимостей в схеме системы. Складывая уравнения (1) при  $D_i = 0$ , получаем

$$\sum_{i=1}^n J_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \sum_{i=1}^n P_{ti} - P, \quad (29)$$

где  $P = \sum_{i=1}^n P_{\text{эм}i}$  получается суммированием всех выражений (2):

$$P = \sum_{i=1}^n E^2_i g_i + \sum_{i=1}^n E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n g_{ij} (E_j - E_i \cos \delta_{ij}). \quad (30)$$

Выражения (29) и (30) показывают, что движение центра инерции системы зависит от движения отдельных генераторов, что это движение может быть как замедляющимся, так и ускоряющимся из-за того, что  $g_{ij}$  могут быть и положительными и отрицательными. Если же все активные проводимости между узлами схемы равны нулю, то центр инерции движется как материальное тело, постоянная времени которого равна сумме постоянных всех генераторов и к которому приложен вращающий момент, равный сумме моментов турбин и электромагнитных моментов генераторов системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цукерник Л. В. Устойчивость связанных систем автоматического регулирования при внутрigrupовой симметрии. — Изв. АН СССР. Энергетика и автоматика, 1959, № 4.
2. Морозовский В. Т. Об устойчивости параллельной работы однотипных синхронных генераторов. — Изв. АН СССР. Энергетика и автоматика, 1959, № 2.
3. Михневич Г. В., Козловский Г. Ф. Устойчивость и качество переходных процессов системы регулирования возбуждения многоагрегатной электростанции. — М.: Изд-во АН СССР, 1969.

[19.02.80]

УДК 621.313.32.001.24

## О режимах работы мощных асинхронизированных синхронных машин в электрической системе

ШАКАРЯН Ю. Г., ЦГОЕВ Р. С. (Москва),  
СУХАНОВ Л. А., САФИУЛЛИНА Р. Х. (Ленинград)

В последние годы рассматриваются варианты разнообразного применения мощных асинхронизированных синхронных машин (АСМ) в электрических системах в качестве гидро- и турбогенераторов, компенсаторов, электромеханических преобразователей, связывающих две электрические системы с различными в общем случае частотами, и др.

Во всех этих случаях для повышения пределов динамической устойчивости, демпфирования колебаний в электрических системах, связи энергосистем желательно или необходимо, чтобы АСМ работала бы синхронно с сетью при сколь-

жении ротора. При этом примущество АСМ при прочих равных условиях будут сказываться тем сильнее, чем больше диапазон рабочих скольжений [Л. 1—3]. Однако известно, что с возрастанием скольжения увеличивается напряжение и мощность возбуждения, возрастает стоимость системы возбуждения АСМ, что может отрицательно сказываться на ее технико-экономических показателях.

В данной статье рассматриваются некоторые аспекты этой проблемы, в частности, дается оценка предельных скольжений и мощности возбуждения АСМ. Асинхронизированная син-

Тип АСМ	Параметры			
	$x(x_d)$ , отн. ед.	$x'(x'_d)$ , отн. ед.	$T_f(T_{d_0})$ , с	$T'f(T'_d)$ , с
С вертикальной осью вращения	2,03	0,36	3,8	0,68
С горизонтальной осью вращения	2,35	0,4	4,56	0,78

Примечание. В скобках даны обозначения параметров, принятые в теории синхронных машин.

хронная машина может выполняться с шихтованным или массивным ротором [Л. 1 и 4], содержащим симметричную обмотку ( $m \geq 2$ ). В данной статье рассматриваются лишь машины с шихтованным ротором.

**Параметры АСМ.** Электромагнитные расчеты и конструктивные проработки, выполненные для АСМ мощностью 100—500 МВт с вертикальной осью вращения и АСМ 100—200 МВт с горизонтальным валом, позволили определить некоторые усредненные значения параметров этих машин, которые приведены в таблице. При этом необходимо отметить, что в качестве базовых машин использовались соответствующие синхронные гидрогенераторы и компенсаторы.

**Предельное скольжение АСМ.** Предельно допустимый диапазон изменения скольжения (скорости) АСМ лимитируется «потолочным» напряжением ротора [Л. 1]. Анализ зависимости напряжения ротора АСМ  $U_f$  в функции режимных параметров, выполненный для машин с параметрами, приведенными в таблице, показывает (см. приложение), что при частотах напряжения ротора  $\omega_f = \omega_r - \omega_c$ , превышающих по абсолютному значению 0,5%, можно эту зависимость упростить и представить в виде:

$$U_f = \frac{\omega_f T_f}{U} \sqrt{(Px')^2 + \left(Qx' + \frac{U^2}{\omega}\right)^2}. \quad (1)$$

Здесь величины записаны в системе относительных единиц [Л. 1], в частности, частоты  $\omega$  и  $\omega_f$  напряжений статора и ротора отнесены к базовой частоте  $\omega_b = \omega_{\text{ном}} = 1$ . Из (1) можно, задаваясь предельным значением напряжения ротора  $U_{f\text{м}}$ , определить предельно допустимое значение частоты ротора  $\omega_{f\text{м}}$  в установившемся режиме. Удобнее, однако, величину  $U_{f\text{м}}$  определить в функции так называемой кратности напряжения ротора:

$$\beta_{f\text{м}} = U_{f\text{м}} / U_{\text{ном}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ном}}$  — значение напряжения ротора при  $\omega_f = 0$ ;  $\omega = 1$ ;  $P = P_{\text{ном}}$ ;  $Q = Q_{\text{ном}}$ . В соответствии с [Л. 1] и учитывая, что в принятой системе относительных единиц  $P_{\text{ном}} = \cos \varphi_{\text{ном}}$ ;  $Q_{\text{ном}} = \sin \varphi_{\text{ном}}$ ;  $U_{\text{ном}} = \omega_{\text{ном}} = 1$ , запишем:

$$U_{f\text{ном}} = \sqrt{x^2 + 2x \sin \varphi_{\text{ном}} + 1}. \quad (3)$$

Из (1), (2) и (3), обозначая через скольжение величину

$$s = \omega_f / \omega = (\omega_r - \omega) / \omega, \quad (4)$$

получим

$$\beta_{f\text{м}} = \frac{T_f \omega s_m}{U} \sqrt{\frac{(Px')^2 + Q(x' + U^2/\omega)^2}{x^2 + 2x \sin \varphi_{\text{ном}} + 1}}. \quad (5)$$

Обычно в установившемся режиме изменение скольжения на работе АСМ не сказывается. Для номинального режима ( $P = P_{\text{ном}}$ ;  $Q = Q_{\text{ном}}$ ;  $U = U_{\text{ном}}$ ;  $\omega = \omega_{\text{ном}}$ ) из (5) получаем

$$\beta_{f\text{м}} = T_f s_{\text{ном}} \sqrt{\frac{x'^2 + 2x' \sin \varphi_{\text{ном}} + 1}{x^2 + 2x \sin \varphi_{\text{ном}} + 1}}. \quad (6)$$

В большинстве случаев применения АСМ в энергосистемах вполне достаточно, чтобы в установившемся режиме скольжение АСМ изменилось в пределах, не превышающих  $s_{\text{ном}} = 3\%$ . Значения  $\beta_{f\text{м}}$ , рассчитанные по (6) при  $s_{\text{ном}} = 3\%$  для  $0.8 \leq \cos \varphi_{\text{ном}} \leq 0.95$ , равны 15—17. Как показывают электромагнитные расчеты, такие кратности напряжения ротора для АСМ достижимы, при этом наибольшее значение напряжения ротора не превышает 2,5—3 кВ, что практически реализуемо. Необходимо подчеркнуть, что в АСМ, в отличие от синхронных машин, форсировка напряжения ротора в устано-

\* Отметим, что в (5) и (6) входит абсолютное значение скольжения  $s_m$  и  $s_{\text{ном}}$ .

вившихся режимах обусловлена необходимостью работы машины со скольжением и не сопряжена с увеличением тока возбуждения [Л. 1].

При работе АСМ в электрической системе, в частности в составе электромеханического преобразователя для связи электрических систем, часто возникает необходимость кратковременной работы со скольжениями, превышающими  $s_{\text{ном}}$ , когда напряжение ротора уже достигло предельно допустимого значения ( $U_f$ ). При этом в течение некоторого времени допустимо превысить номинальные значения токов статора и ротора: согласно ГОСТ 533—68 и 5616—72 в течение 50 с допускается работа электрической машины с двукратным номинальным током.

В соответствии с (5) значение  $s_m$  можно повысить при заданных  $U$ ,  $\omega$  и  $\beta_{f\text{м}}$  только изменяя значения активной и реактивной мощностей машины. Если АСМ работает непосредственно на шины бесконечной мощности, т. е. при изменении  $P$  и  $Q$  напряжение  $U$  остается постоянным, то, как следует из (5), при неизменном значении активной мощности АСМ скольжение достигает наибольшего значения при

$$Q = -\frac{U^2}{\omega x'}. \quad (7)$$

Это значение  $Q$  при  $U = U_{\text{ном}}$  и  $\omega = \omega_{\text{ном}} = 1$  примерно в 2,5—2,6 раза больше номинального (см. таблицу). Значению  $Q$  по (7) соответствует скольжение

$$s_m = \frac{U \beta_{f\text{м}}}{T_f} \frac{\sqrt{x'^2 + 2x' \sin \varphi_{\text{ном}} + 1}}{Px'}. \quad (8)$$

С учетом (6) запишем

$$\frac{s_m}{s_{\text{ном}}} = \frac{U \sqrt{x'^2 + 2x' \sin \varphi_{\text{ном}} + 1}}{Px'}. \quad (8)$$

Используя параметры АСМ из таблицы, можно для приближенных расчетов, полагая  $x'^2 + 2x' \sin \varphi_{\text{ном}} + 1 \approx 1$ , формулу (8) упростить и представить в виде

$$\frac{s_m}{s_{\text{ном}}} = \frac{U^2}{Px'}. \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) следует, что при неизменных  $U$  и  $P$  (в частности, при  $U = U_{\text{ном}}$  и  $P = P_{\text{ном}}$ ) можно достичь значения скольжения  $s_m$  примерно в 3,5 раза больше номинального.

Большой практический интерес для определения скольжения  $s_m$  представляет случай работы АСМ через некоторую внешнюю реактивность  $x_{\text{вн}}$  на шины неизменного напряжения  $U_c$ . В этом случае при увеличении токов машины, что обусловлено изменением реактивной мощности  $Q$ , будет падать напряжение  $U$ , а значит,  $s_m$  окажется меньшим, чем при  $U = \text{const}$ .

Скольжение АСМ при  $P = \text{const}$  в этих условиях достигает наибольшего значения, когда реактивная мощность на шинах неизменного напряжения

$$Q_c = -\frac{U^2 c}{\omega (x' + x_{\text{вн}})}. \quad (10)$$

Этой реактивной мощности будет соответствовать скольжение

$$s_m = \frac{U_c}{P(x' + x_{\text{вн}})} \sqrt{x'^2 + 2x' \sin \varphi_{\text{ном}} + 1} \approx \frac{U_c}{P(x' + x_{\text{вн}})}. \quad (11)$$

Напряжение и реактивная мощность машины, соответствующие (10), вычисляются по формулам:

$$U = \sqrt{\left(U_c + x_{\text{вн}} \frac{Q_c}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{x_{\text{вн}} P}{U_c}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{x' U_c}{x' + x_{\text{вн}}}\right)^2 + \left(\frac{x_{\text{вн}} P}{U_c}\right)^2}; \quad (12)$$

$$Q = Q_c + x_{\text{вн}} \frac{P^2 + Q^2 c}{U^2 c} = -\frac{x' U^2 c}{(x' + x_{\text{вн}})^2} + \frac{x_{\text{вн}} P^2}{U^2 c}. \quad (13)$$

На рис. 1 в соответствии с (11) построены зависимости  $s_m/s_{\text{ном}} = f(P/P_{\text{ном}})$ . Эти зависимости показывают, что  $s_m$  всегда больше  $s_{\text{ном}}$ . При этом превышение тем больше, чем меньше значение  $x_{\text{вн}}$ . Так, при  $x_{\text{вн}} = 0$   $s_m \approx 3,5 s_{\text{ном}}$ , а при

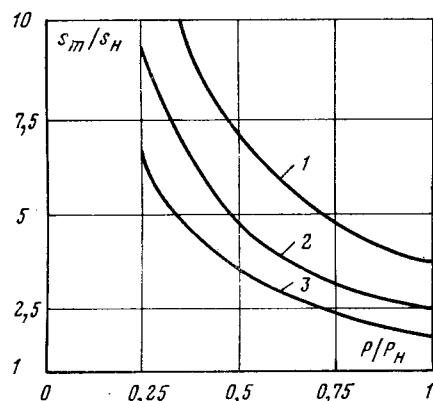


Рис. 1. Зависимость скольжения АСМ в переходном режиме

от активной мощности при  $Q_c = -\frac{U_c^2}{(x' + x_{BH})\omega}$ .

1 —  $x_{BH}=0$ ; 2 —  $x_{BH}=0,2$ ; 3 —  $x_{BH}=0,4$ .

$x_{BH}=0,4$   $s_m=1,42s_{nom}$ . Из рис. 1 также следует, что с уменьшением  $P$  при прочих равных условиях  $s_m$  возрастает.

На рис. 2 по выражениям (12) и (13) построены зависимости  $U(x_{BH})$ ,  $Q_c(x_{BH})$  и  $Q(x_{BH})$  при  $P=P_{nom}$ . Эти зависимости показывают, что с возрастанием  $x_{BH}$  напряжение  $U$  падает, однако  $Q_c$  и  $Q$  возрастают. Последнее обстоятельство может иметь определенное практическое значение, когда в точке подсоединения АСМ к энергосистеме недопустим даже кратковременный дефицит реактивной мощности.

Во всех рассмотренных случаях, как указывалось, токи в машине будут превосходить номинальные значения, и, стало быть, работа АСМ со скольжениями  $s > s_{nom}$  может быть допущена лишь кратковременно.

На рис. 3 в качестве примера при  $\omega=1$ ,  $P=P_{nom}$  и  $\beta_{fm}=18$  для значений  $x_{BH}=0$  и  $x_{BH}=0,3$  построены в функции скольжения зависимости  $i=I/I_{nom}$ ;  $i_f=I_f/I_{fnom}$ ;  $Q$ ;  $Q_c$ ,  $\beta_f$  и  $U$ . Анализ этих зависимостей показывает, что при  $x_{BH}=0$  и  $Q=-\frac{U^2}{\omega x}$ ,  $i=2,9$ ,  $i_f=1,9$ . Если задаться меньшими кратностями токов, чем полученные, то значения скольжений окажутся меньше. Так, если предположить, что  $i \leq 2$ , получим  $s_m \leq 0,072$ .

При  $x_{BH}=0,3$  кратности токов уменьшаются, но при этом уменьшается и  $s_m$ , которое оказывается равным 0,057.

Практический интерес в этом случае может представлять скольжение при  $Q_c=0$ , когда нежелателен (или недопустим) дефицит реактивной мощности. Как видно из рис. 3, значению  $Q_c=0$  соответствует  $s_m=0,032$ , т. е. по сравнению с номинальным скольжением ( $s_{nom}=0,03$ ) это скольжение оказывается в 1,07 раз больше.

Итак, для АСМ имеется принципиальная возможность кратковременного увеличения предельного скольжения при неизменных допустимых напряжениях ротора и активной мощности машины путем перевода ее в режим глубокого потребления реактивной мощности и кратковременного увеличения (сверх номинальных значений) токов статора и ротора.

**Мощность возбуждения. Установленная мощность системы возбуждения.** Рассмотрим технико-экономические показатели системы возбуждения, содержащей преобразователь частоты и либо вспомогательную синхронную машину (в случае независимого возбуждения), либо трансформатор (в случае схемы самовозбуждения). Установленная мощность системы возбуждения определяется при прочих условиях мощностью роторной цепи — мощностью возбуждения машины [Л. 1 и 4]. Мощность возбуждения АСМ в принятой выше системе относительных единиц

$$S_f = \frac{U_{fm}E}{(x - x')T_f}, \quad (14)$$

где  $E$  — э. д. с. статора АСМ.

С учетом (2) и (3), а также выражая э. д. с. через  $U$ ,  $P$  и  $Q$ , находим

$$S_f = \frac{\beta_{fm}}{T_f U (x - x')} \times$$

$$\times \sqrt{(x^2 + 2x \sin \varphi_{nom} + 1) \left[ (Px)^2 + \left( Qx + \frac{U^2}{\omega} \right)^2 \right]}. \quad (15)$$

Если режим цепи статора машины неизменен и соответствует номинальному, то из (15) получим

$$S_{fnom} = \frac{\beta_{fm}}{T_f (x - x')} (x^2 + 2x \sin \varphi_{nom} + 1). \quad (16)$$

С учетом (6) и (16) можно записать

$$S_{fnom} = \frac{s_{nom}}{x - x'} \sqrt{(x^2 + 2x \sin \varphi_{nom} + 1) (x'^2 + 2x' \sin \varphi_{nom} + 1)}. \quad (17)$$

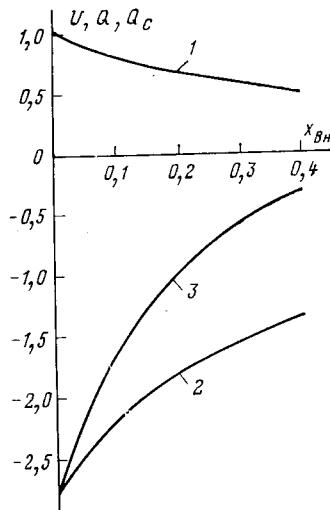


Рис. 2. Зависимости  $U$  (1);  $Q_c$  (2) и  $Q$  (3) от  $x_{BH}$  при  $P=P_{nom}$  и

$$Q_c = -\frac{U_c^2}{(x' + x_{BH})\omega}.$$

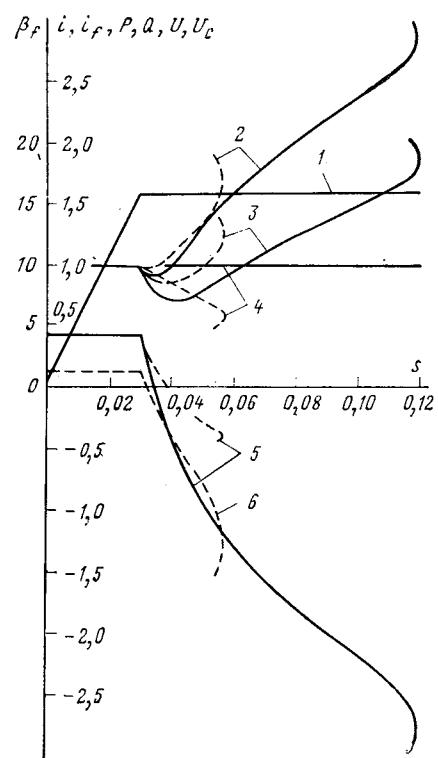


Рис. 3. Зависимости  $\beta_f$  (1);  $i=I/I_{nom}$  (2);  $i_f=I_f/I_{fnom}$  (3);  $U$  (4);  $Q$  (5) и  $Q_c$  (6) от скольжения АСМ в переходных режимах при  $P=P_{nom}$  и  $\omega=1$ .

Учитывая приведенные ранее соотношения между параметрами АСМ, из (17) получим выражение, пригодное для приближенных оценок,

$$S_{f\text{ном}} \approx 2S_{\text{ном}}. \quad (18)$$

Таким образом, скольжению  $S_{\text{ном}} = 3\%$  соответствует значение  $S_{f\text{ном}} = 6\%$  полной номинальной мощности статора. Значениям  $Q = -U^2/(x'\omega)$  и  $\beta_f = \beta_{fm}$  соответствует мощность возбуждения

$$S_{fm} = \frac{\beta_{fm} U}{T_f x' \omega} \sqrt{x^2 + 2x \sin \varphi_{\text{ном}} + 1} \quad (19)$$

или, с учетом (16),

$$\frac{S_{fm}}{S_{f\text{ном}}} = \frac{x - x'}{x'} \frac{U^2/\omega}{\sqrt{x^2 + 2x \sin \varphi_{\text{ном}} + 1}}. \quad (20)$$

Подставляя значения параметров АСМ для случая  $U = \omega = 1$ , получим

$$S_{fm} \approx 1.8 S_{f\text{ном}}. \quad (21)$$

Установленная мощность системы возбуждения АСМ  $S_{c.v}$  определяется не только мощностью возбуждения, но и схемой преобразователя частоты, числом фаз нагрузки (ротора АСМ), питания и т. п. [Л. 4 и 5]. Установленная мощность системы возбуждения с достаточной степенью точности может вычисляться по формуле [Л. 5]:

$$S_{c.v} = k S_f, \quad (22)$$

где  $k = 4/3$  для машины с трехфазной обмоткой ротора;  $k = \sqrt{2}$  — для машины с двухфазной обмоткой. Заметим, что, как правило, тиристорные преобразователи частоты и соответствующие источники питания (вспомогательные синхронные машины или трансформаторы) проектируются с учетом возможности кратковременной (обычно до 30—50 с) работы с двойной перегрузкой по току, а, следовательно, и мощности. Учитывая это обстоятельство и значение  $S_{fm}$ , определяемое соотношением (21), заключаем, что значение установленной мощности системы возбуждения можно определять, исходя из величины  $S_{f\text{ном}}$ , а не  $S_{fm}$ , если длительность работы АСМ со скольжением  $|s_m| > |s_{\text{ном}}|$  не превосходит допустимой длительности работы системы возбуждения с перегрузкой. В большинстве практических случаев это как раз имеет место, и в этих случаях можно из формулы (22) получить

$$S_{c.v} \approx 2.8 S_{\text{ном}}. \quad (23)$$

Значению  $S_{\text{ном}} = 3\%$  соответствует, следовательно, установленная мощность системы возбуждения  $S_{c.v} = 8.4\%$  полной номинальной мощности статора.

**Выходы.** Асинхронизированные синхронные машины большой мощности с шихтованным сердечником ротора позволяют в установленныхся режимах работать со скольжением до 3%. Установленная мощность системы возбуждения при этом составляет 8% мощности машины, а отношение напряжения ротора к напряжению при синхронной частоте вращения оказывается равным 16. Такие машины могут без увеличения установленной мощности системы возбуждения и кратности напряжения ротора кратковременно работать в режимах потребления реактивной мощности со скольжением, в 2—3 раза большим, чем в установленном режиме, причем чем больше внешнее реактивное сопротивление между машиной и сетью, тем

меньше предельное значение скольжения. При этом уменьшаются кратности токов и возрастает реактивная мощность машины.

**Приложение.** Приближенная формула для расчета напряжения ротора.

В [Л. 1] приведена формула для вычисления напряжения ротора:

$$u_f = \sqrt{(1 + s^2 T_f'^2) \frac{x^2}{U^2} (P^2 + Q^2) + (1 + s^2 T_f^2) U^2 + 2 [Qx (1 + s^2 T_f T_f') - \mu T_f s P x]}. \quad (\text{П-1})$$

Постоянные времени, входящие в эту формулу, выражены в радианах. Нас интересует напряжение  $u_f$  для предельных скольжений АСМ, когда  $|s| \geq 0.5\%$ . Для этих скольжений с учетом параметров машины, приведенных в таблице, можно принять:

$$1 + s^2 T_f^2 \approx s^2 T_f'^2; \quad 1 + s^2 T_f'^2 \approx s^2 T_f^2; \quad (\text{П-2})$$

$$Qx (1 + s^2 T_f T_f') \approx Qx s^2 T_f T_f' \gg \mu T_f s P x.$$

С учетом этого получим

$$u_f = s T_f \sqrt{\frac{x'^2 (P^2 + Q^2)}{U^2} + U^2 + 2Qx'} = s T_f \sqrt{\left(\frac{x'P}{U}\right)^2 + \left(\frac{x'Q}{U} + U\right)^2} \quad (\text{П-3})$$

Если частота напряжения статора  $\omega$  отличается от синхронной  $\omega_c = 1$  в принятой системе относительных единиц, то

$$u_f = s \omega T_f \sqrt{\left(\frac{x'P}{U}\right)^2 + \left(\frac{x'Q}{U} + \frac{U}{\omega}\right)^2}.$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ботвинник М. М., Шакарян Ю. Г. Управляемая машина переменного тока. — М.: Наука, 1969.
2. О применении электромеханических преобразователей частоты в энергосистемах/ Веников В. А., Зеленохат Н. И., Шакарян Ю. Г., Дункель Х. Г. — Электричество, 1977, № 4.
3. Сопоставительный анализ устойчивости синхронных и асинхронизированных синхронных генераторов в режимах недовозбуждения/ Орсоева А. А., Рагозин А. А., Филичев О. Н., Шакарян Ю. Г. — Электричество, 1977, № 7.
4. Глебов И. А., Суханов Л. А., Сафиуллина Р. Х. Электромеханические преобразователи частоты для связи электроэнергетических систем. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1977, № 6.
5. Блоцкий Н. Н. Электромагнитные процессы в преобразователях частоты с непосредственной связью. — Труды ВНИИЭ, 1972, вып. 42.
6. Жемеров Г. Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. — М.: Энергия, 1977.

[29.10.79]

УДК 621.311.44:621.3.016.25.077.8

## О применении компенсирующих устройств в системах электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками

ФЕДОРОВ А. А., доктор техн. наук, КОРНИЛОВ Г. П., инж.

Московский энергетический институт

Свыше 40% всей вырабатываемой электроэнергии преобразуется различными статистическими (вентильными) устройствами. Широкое применение нашли вентильные преобразователи (ВП) постоянного тока в электроприводе, электротехнологии, железнодорожном транспорте. Как правило, они работают в режиме глубокого регулирования с резонанс-

ременной ударной нагрузкой и, будучи приемниками с нелинейными характеристиками, искажают кривую питающего тока и напряжения, вызывают значительные колебания напряжения и потери электроэнергии.

Задача уменьшения воздействия ВП на питающую сеть имеет большое народнохозяйственное и практическое значе-

ние, так как ее решение непосредственно связано с одной из острых проблем сегодняшней энергетики — проблемой экономии электроэнергии и улучшения ее качества.

Как показали исследования, полностью поставленная задача может быть решена при использовании компенсирующих устройств, выбираемых из условия минимума определенной целевой функции, например расчетных приведенных затрат (3), в которой учитываются дополнительные капитальные вложения на компенсирующие устройства  $K_{k.y}$ , суммарные потери электроэнергии в элементах сети и преобразователя от перетоков реактивной мощности  $\Delta P_Q$ , потери в компенсирующих устройствах  $\Delta P_{k.y}$ ,

$$3=F(K_{k.y}, \Delta P_Q, \Delta P_{k.y}) \rightarrow \min \quad (1)$$

при дополнительном ограничении, что показатели качества напряжения (отклонения  $V$ , колебания —  $V_t$ , коэффициент несинусоидальности —  $K_{nc}$ ) устанавливаются дифференцировано для каждого вида нагрузки и не превышают допустимых значений:

$$V < V_{\text{доп}}; V_t < V_{t \text{ доп}}; K_{nc} < K_{nc \text{ доп}}. \quad (2)$$

Компенсация реактивной мощности ударных вентильных нагрузок имеет существенные особенности; так, использование традиционных средств — синхронных компенсаторов и конденсаторных батарей — не всегда эффективно, так как ограничено их невысоким быстродействием и чувствительностью к высшим гармоникам. Поднятые вопросы не нашли должного отражения ни в «Указаниях по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях», ни в других руководящих материалах.

В статье приведены результаты теоретических исследований и рекомендации использования компенсирующих устройств, обеспечивающих экономию электроэнергии и улучшение ее качества.

К преобразователям постоянного тока предъявляются противоречивые требования: с одной стороны — как к элементу электропривода, а с другой — специальному приемнику с нелинейными характеристиками в системе электроснабжения. Так, при работе на двигатель постоянного тока преобразователь должен обеспечивать значительный запас по напряжению в динамических и аварийных режимах. Это обуславливает глубокое регулирование выпрямленного напряжения и как следствие — повышенное потребление реактивной мощности. Для устранения этого противоречия были предложены схемы компенсированных преобразователей с конденсаторами на вентильной обмотке [Л. 1]. Установленная мощность конденсаторов рассчитывается из условия минимума суммарных потерь электроэнергии:

$$Q_{KB} = \frac{1}{K_{\text{раб}}^2 K_{\text{вкл}} + K_x^2 (1 - K_{\text{вкл}})} \left\{ K_{\text{раб}} K_{\text{вкл}} Q_{B\Pi} - \frac{U^2 \Delta P_{KB} [K_{\text{раб}} K_{\text{вкл}} + K_x (1 - K_{\text{вкл}})]}{2R_{\text{об}}} \right\}, \quad (3)$$

где  $K_{\text{вкл}}$  — коэффициент включения преобразователя;  $K_{\text{раб}}$ ,  $K_x$  — коэффициенты, учитывающие выдачу реактивной мощности конденсаторами в зависимости от напряжения при работающем и отключенном преобразователе (порядок и формулы расчета коэффициентов даны в приложении);  $Q_{B\Pi}$  — среднее значение реактивной мощности ВП;  $\Delta P_{KB}$  — удельные потери активной мощности в конденсаторах;  $R_{\text{об}}$  — общее активное сопротивление сети и преобразовательного трансформатора, приведенное к напряжению вентильной обмотки  $U_2$ .

Для лучшего использования конденсаторов по току, напряжению, а также для отстройки от резонансов на высших гармониках следует выполнять условие:

$$\mu = \sqrt{\frac{x_{KB}}{x_p + x_r}} = 2,75 \div 3,5, \quad (4)$$

здесь  $x_{KB}$ ,  $x_p$ ,  $x_r$  — сопротивления конденсаторов, преобразовательного трансформатора и реактора на фазу.

При включении конденсаторов к вентильной обмотке повышается напряжение основной гармоники и уменьшается сопротивление контура коммутации, что способствует увеличению запаса по напряжению преобразователя, кроме того: уменьшается загрузка преобразовательного трансформатора; снижаются активные потери (потери электроэнергии) в эле-

ментах системы электроснабжения; улучшается гармонический состав потребляемого (сетевого) тока.

На рис. 1 приведена зависимость коэффициента загрузки преобразовательного трансформатора  $K_3$  от выпрямленного тока при различных мощностях конденсаторов  $K_p = x_r/x_{KB}$ .

Очевидно, в результате присоединения конденсаторов к вентильной обмотке не менее чем на 15% снижается загрузка преобразовательного трансформатора, что позволяет уменьшить его установленную (типовую) мощность. Снижение потребляемого тока приводит к уменьшению потерь электроэнергии. Коэффициент изменения потерь для преобразовательного трансформатора [Л. 2]

$$K_{\text{и.п.}} = \frac{\Delta P_k}{S_{\text{ном.т}}} \frac{100}{u_k} (K_b \sqrt{1 - U_{\text{в*}}^2} - K_p K_{\text{н.к.}}^2),$$

где  $\Delta P_k$ ,  $u_k$  — потери мощности и напряжение короткого замыкания трансформатора;  $S_{\text{ном.т}}$  — его номинальная мощность; остальные величины даны в приложении.

Расчеты показывают, что в этом случае потери электроэнергии в элементах системы электроснабжения от перетоков реактивной мощности снижаются в среднем на 35—40%.

Установлено, что несинусоидальность напряжения со стороны питающей сети при включении конденсаторов к вентильным обмоткам  $K_{nc(\text{в.о.})}$  не увеличивается по сравнению с традиционной схемой их присоединения в составе фильтров на стороне высшего напряжения (к сетевой обмотке трансформатора  $K_{nc(\text{с.о.})}$ ), если параметр  $\mu$  не превышает 3,5. На рис. 2 показана зависимость  $K_{nc(\text{с.о.})}^* = K_{nc(\text{в.о.})}/K_{nc(\text{с.о.})}$  от параметра  $\mu$  при работе преобразователя с номинальными значениями выпрямленного тока и напряжения.

Установка конденсаторов не уменьшает, а лишь сдвигает зону отклонений и колебаний напряжения в положительную область; ее границы определяются из выражения

$$V_t = \frac{Q_{B\Pi} + Q_{KB} (K_x - K_{\text{раб}})}{S_k} = \frac{Q_{\Sigma}}{S_k},$$

где  $S_k$  — мощность короткого замыкания в узле нагрузки.

Чтобы колебания напряжения в узле нагрузки не превышали допустимых значений, должно выполняться условие  $Q_{\Sigma} < V_{t \text{ доп}} S_k$ . Этого можно добиться при ступенчатом ре-

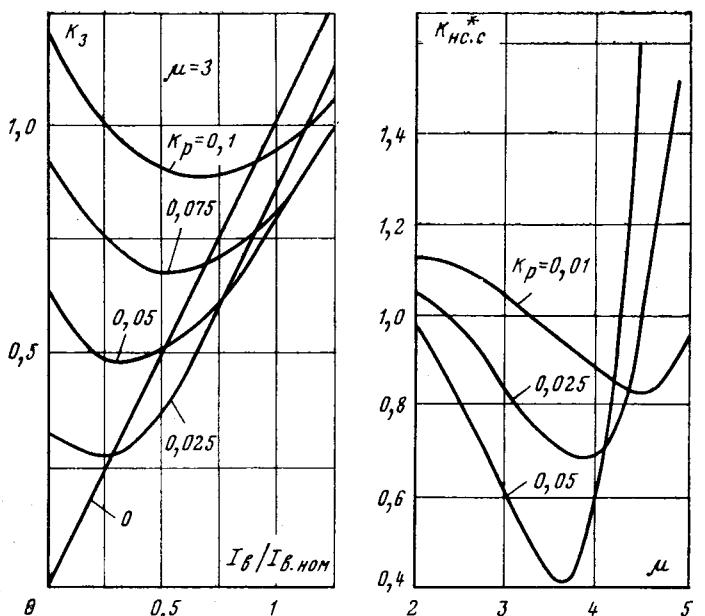


Рис. 1. Зависимость коэффициента загрузки преобразовательного трансформатора от выпрямленного тока при различных мощностях конденсаторов ( $K_p = 0$  — конденсаторы отсутствуют).

Рис. 2. Зависимости относительного коэффициента несинусоидальности напряжения питающей сети от параметра  $\mu$ .

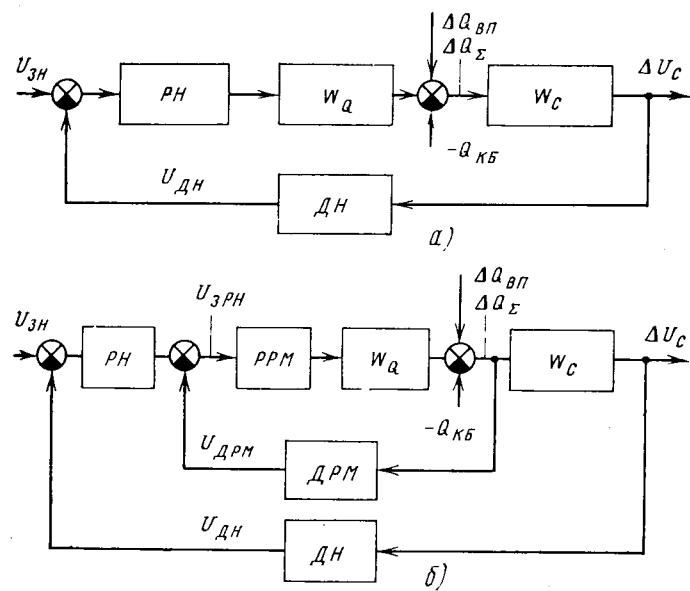


Рис. 3. Структурные схемы регулирования напряжения и реактивной мощности в узле нагрузки.  
 а—одноконтурная; б—двухконтурная;  $U_{з.н.}$ ,  $U_{ДН}$  — заданное и действительное значения напряжения в узле нагрузки;  $U_{з.р.м.}$ ,  $U_{ДРМ}$  — заданное и действительное значения реактивной мощности.

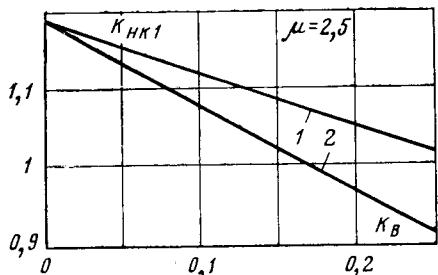


Рис. 4. Зависимости изменения относительного значения напряжения основной частоты на конденсаторах от выпрямленного тока.

*a* — для  $\mu=2,5$ ; *b* — для  $\mu=3$ ; *c* — для  $\mu=3,5$ ;  $1-U_{B*}=0,8$ ;  $2-U_{B*}=0$ .

$$V'_t = \frac{Q_{KB}}{S_v} K_x + \frac{Q_{BII} - Q_{KB} K_{\text{раб}}}{S_v}.$$

Установка дополнительной регулируемой индуктивности преследует те же цели. Известно несколько вариантов ее исполнения, например: преобразователь, защищенный со стороны постоянного тока реактором [Л. 4]; последовательное соединение реакторов с управляемыми вентилями, включенными встречно-параллельно [Л. 5]; в реверсивном преобразователе с двумя группами вентиляй и совместным управлением в качестве регулируемой индуктивности могут быть использованы токоограничивающие реакторы в контуре уравнительного тока [Л. 6].

Одним из основных показателей регулируемых компенсирующих устройств независимо от исполнения является их быстродействие. Большое значение в связи с этим приобретает синтез системы регулирования напряжения в узле с ударной вентильной нагрузкой. Ниже приведены некоторые результаты экспериментальных исследований замкнутой системы регулирования напряжения, полученные на физической модели с двумя ВП. С помощью одного из них создавалось

возмущающее воздействие в узле нагрузки в виде наброса реактивной мощности  $\Delta Q_{BП}$ .

Второй преобразователь был зашунтирован реактором и использовался в качестве регулируемой индуктивности. Исследования проводились для двух систем — одноконтурной с регулятором напряжения  $PH$ , (рис. 3,а) и двухконтурной с регулятором реактивной мощности  $PPM$  во внутреннем контуре регулирования и регулятором напряжения — во внешнем (рис. 3,б).

При анализе принимались следующие допущения. Наброс реактивной мощности не вызывает нарушения статической устойчивости и изменения частоты. Передаточная функция узла нагрузки  $W_c$  — пропорциональное звено с коэффициентом передачи  $K_c$ . Преобразователь, замещен последовательным соединением двух инерционных звеньев с постоянными временем  $T_y$ ,  $T_Q$  и общим коэффициентом передачи  $K_Q$ :

$$W_{Q(P)} = \frac{K_Q}{(1 + T_{yP})(1 + T_{QP})}.$$

Малая постоянная времени  $T_y$  ( $T_y \approx 0,01$  с) определяется постоянной времени системы импульсно-фазового управления; постоянная времени  $T_Q$  зависит от индуктивности реактора в цепи выпрямленного тока и определяется экспериментально ( $T_Q = 0,02 \pm 0,04$  с).

Датчики напряжения (ДН) и реактивной мощности (ДРМ) считаются безынерционными. С учетом принятых допущений возможны следующие варианты регуляторов:

В одноконтурной системе  $RH$  выполняется пропорциональным —  $(RH - P)$  (вариант 1) или пропорционально-интегральным —  $RH - PI$  (вариант 2).

В двухконтурной системе  $PPM$  — пропорциональный,  $RH$  — интегральный  $PPM$  —  $\Pi$ ,  $RH$  —  $I$  (вариант 3) или  $PPM$  — пропорционально-интегральный,  $RH$  — интегральный —  $PPM$  —  $\Pi I$ ,  $RH$  —  $I$  (вариант 4).

Синтез регуляторов напряжения и реактивной мощности приводится в соответствии с теорией подчиненного регулирования параметров [Л. 7 и 8]. Расчет их передаточных функций дан в приложении.

В таблице приведены показатели переходных процессов (время переходного процесса  $t_{\text{п.п.}}$ , с; максимальная динамическая «кошибка» напряжения  $\Delta U \%$ ) в замкнутой системе регулирования при набросе и снятии возмущающего воздействия (реактивной мощности  $\Delta Q_{BN}$ ). Наилучшие показатели обеспечивают одноконтурная система с  $P$ -регулятором на напряжения и двухконтурная с  $PI$ -регулятором реактивной мощности и  $I$ -регулятором напряжения.

**Выводы:** 1. Компенсация реактивной мощности вентильных преобразователей, в частности за счет конденсаторов, присоединяемых к вентильным обмоткам трансформаторов, является эффективным средством снижения потерь электрической энергии и улучшения ее качества.

2. Замкнутая система регулирования напряжения значительно снижает колебания напряжения при набросе реактивной мощности в узле нагрузки и обеспечивает любую точность его регулирования в установившемся режиме.

**Приложение. Порядок расчета конденсаторов, присоединяемых к вентильной обмотке трансформатора.**

По напряжению вентильной обмотки выбирается nominalное напряжение конденсаторов  $U_{ном\ KБ}$  и схема их соединения — звезда или треугольник. Для предварительно выбранного параметра  $\mu$  проверяются условия:

$$K_{HK} = V^3 \frac{U_{\text{ном}} KE}{U_2} \geq \frac{\mu^2}{\mu^2 - 1} \text{ — для схемы соединения в звезду}$$

Вариант системы регулиро- вания	Показатели переходного процесса				Статическая ошибка регули- рования напря- жения в уста- новившемся режиме	
	при набросе $\Delta Q_{BP}$		при сбросе $\Delta Q_{BP}$			
	$t_{\text{н.п.}}$ , с	$\Delta U$ , %	$t_{\text{н.п.}}$ , с	$\Delta U$ , %		
1	0,023	2,1	0,023	2,1	0,42	
2	0,045	4,0	0,06	4,5	—	
3	0,04	1,85	0,05	1,8	—	
4	0,02	1,3	0,03	2,6	—	

$K_{h.k} = \frac{U_{\text{ном}} K_B}{U_2} \geq \frac{\mu^2}{\mu^2 - 1}$  — для схемы соединения в треугольник.

Из графиков рис. 4 определяется относительная величина напряжения основной гармоники на конденсаторах при работающем преобразователе  $K_{h.k}$ .

Определяются коэффициенты

$$K_{\text{раб}} = \left( \frac{K_{h.k1}}{K_{h.k}} \right)^2; \quad K_x = \left[ \frac{\mu^2}{(\mu^2 - 1) K_{h.k}} \right]^2.$$

По уравнению (3) рассчитывается мощность конденсаторов.

Рассчитываются сопротивления конденсаторов, трансформаторов и реактора (на фазу):

$$x_{KB} = \frac{U_{\text{ном}}^2 K_B}{Q_{KB}}; \quad x_t = \frac{u_k}{100} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном},t}}; \quad x_p = \frac{x_{KB}}{\mu^2} - x_t.$$

Определяется коэффициент  $K_p$ , уточняются —  $\mu$ ,  $K_B$ ; оценивается влияние конденсаторов на работу преобразователя.

*Расчетные выражения.*  $K_B$  — коэффициент, характеризующий мощность ВП,  $K_B = \frac{u_k}{100} \frac{I_B U_B}{S_{\text{ном},t}}$ ,  $I_B$ ,  $U_B$  — средние

значения выпрямленного тока и напряжения;  $U_{B*}$  — относительная величина выпрямленного напряжения,  $U_{B*} = U_B/U_{B0}$ ;  $U_{B0}$  — выпрямленное напряжение на идеальном холостом ходу при отсутствии регулирования; для шестипульсного мостового преобразователя

$$U_{B0} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U_2.$$

*Расчет регуляторов напряжения и реактивной мощности.* Регулятор напряжения пропорциональный ( $PH-P$ ):

$$K_{PH} = \frac{T_Q}{2T_y K_Q K_c K_{DH}}.$$

Регулятор напряжения пропорционально-интегральный ( $PH-II$ ):

$$W_{PH}(p) = \frac{1 + T_Q p}{2T_y K_Q K_c K_{DH}}.$$

Регулятор реактивной мощности — пропорциональный, регулятор напряжения — интегральный ( $PPM-P$ ,  $PH-I$ ):

$$K_{PPM} = \frac{T_Q}{2T_y K_Q K_{DPM}};$$

$$W_{PPM}(p) = \frac{K_{DPM}}{2K_c K_{DH} p}.$$

Регулятор реактивной мощности — пропорционально-интегральный, регулятор напряжения — интегральный ( $PPM-II$ ,  $PH-I$ ):

$$W_{PPM}(p) = \frac{1 + T_Q p}{2T_y K_Q K_{DPM} p};$$

$$W_{PH}(p) = \frac{K_{DPM}}{2K_c K_{DH} p}.$$

Здесь  $p$  — оператор дифференцирования;  $K_{PH}$ ,  $K_{DH}$ ,  $K_{PPM}$ ,  $K_{DPM}$  — коэффициенты передачи соответственно регулятора и датчика напряжения, регулятора и датчика реактивной мощности;  $W_{PH}$ ,  $W_{PPM}$  — передаточные функции регулятора напряжения и реактивной мощности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров А. А., Корнилов Г. П. Повышение технико-экономических показателей вентильных преобразователей постоянного тока. — Промышленная энергетика, 1977, № 11.
2. Федоров А. А. Теоретические основы электроснабжения промышленных предприятий. — М.: Энергия, 1976.
3. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях/ Веников В. А., Жуков Л. А., Карташев И. И., Рыжов Ю. П. — М.: Энергия, 1975.
4. Jahn K., Pahud J. D., Schüller W. Statische Blindleistungskompensation der Pulsstromversorgung des GERN — Zwischenbeschleunigers «Booster». — Siemens Zeitschrift, 1973, N. 10.
5. Худяков В. В., Чванов В. А. Управляемый статический источник реактивной мощности. — Электричество, 1969, № 1.
6. Способ уменьшения колебаний напряжения питающей сети мощных реверсивных вентильных преобразователей/ Солодухо Я. Ю., Деревенец А. И., Каствовский К. А., Крант М. Д. — В кн.: Инструктивные указания по проектированию электрических промышленных установок. — М.: Энергия, 1974, № 2.
7. Управление вентильными электроприводами постоянного тока/ Лебедев Е. Д., Неймарк В. Е., Пистрак М. Я., Слежановский О. В. — М.: Энергия, 1970.
8. Фрер Ф., Ортенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования. — М.: Энергия, 1973.

[03.10.79]

УДК 621.316.933.8(083.75)

## Допустимые напряжения прикосновения в проекте стандарта СЭВ

ЯБЛОНЬСКИ В., ШАТКОВСКА-КАРПА Б.  
Вроцлавский политехнический институт, ПНР

Разработанный в ПНР в соответствии с планом работ по стандартизации СЭВ проект стандарта для защитных заземлений в электроэнергетических установках переменного тока напряжением выше 1 кВ содержит требования к дополнительным мерам защиты от поражения электрическим током, основанным на наибольших допустимых напряжениях прикосновения и шага. Зависимости этих напряжений от времени поражения, принятые авторами проекта, отличаются от принимаемых в стандартах или предписаниях отдельных стран — членов СЭВ; поэтому следует ожидать, что они будут предметом широкой дискуссии.

В статье дано обоснование изменений зависимости наибольших допустимых напряжений прикосновения от времени поражения. Авторы надеются, что настоящая статья позволит читателям лучше понять требований стандарта после его вступления в законную силу, а дискуссия, вызванная этой статьей, — разработать окончательную редакцию стандарта наиболее правильным образом.

На рис. 1 приведены зависимости наибольших допустимых напряжений прикосновения от времени поражения по стандартам, предписаниям или действующим рекомендациям большинства стран — членов СЭВ и некоторых западных стран. В случаях, когда в государственных стандартах приведено несколько зависимостей, для иллюстрации показана только зависимость, предъявляющая к мерам защиты наиболее строгие требования. Из сопоставления приведенных зависимостей видно, что существуют большие расхождения в значениях опасных напряжений. Анализ опубликованных в последние годы статей показал, что действующие нормы не вполне правильны, так как в большинстве случаев не учитывают следующего: изменения взглядов на опасные для человека значения токов; зависимости поражающего тока от полного сопротивления тела человека; влияния вероятности поражения человека на критерии определения объема средств защиты от поражения электрическим током.

**Предельные значения поражающих токов.** Принимая за основу нормирования напряжений прикосновения предельные допускаемые поражающие токи, необходимо решить два основных вопроса. Первый из них касается последствий действия тока на человеческий организм, которые следует признать опасными. Второй касается значений поражающих токов, которые вызывают эти последствия.

Мнение о том, что значения допустимых поражающих токов при повреждениях в электроустановках напряжением выше 1 кВ должны устанавливаться таким образом, чтобы они не вызывали с вероятностью 0,5—1% смерти поражаемых лиц, в настоящее время не вызывает возражений. Смерть поражаемых лиц наступает чаще всего вследствие фибрилляции желудочков сердца или вследствие термического действия тока, протекающего через человеческое тело. К сожалению, до настоящего времени не накоплено достаточно материала, на основании которого можно было бы установить зависимость смертельного исхода, вызванного термическим действием тока, от его значения и времени действия. Поэтому стандарты и предписания в различных странах, а также проект стандарта СЭВ основываются на исследованиях, авторы которых пытались установить значения токов, вызывающих фибрилляцию желудочков сердца людей и животных. Результаты этих исследований показаны на рис. 2. Так же, как и при сравнении зависимостей, представленных на рис. 1, здесь заметны большие расхождения. Это объясняется сложностью еще полностью не изученного механизма некоторых патофизических явлений, а также в значительной степени различиями в статистической обработке результатов испытаний.

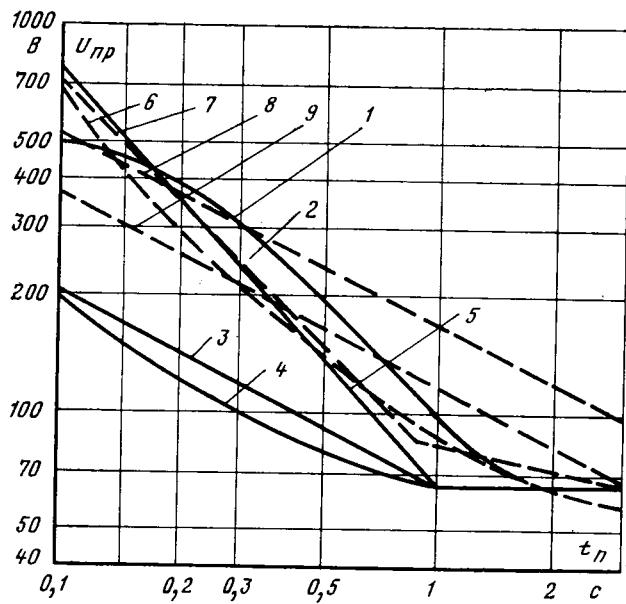


Рис. 1. Зависимости (обязательные или рекомендуемые) наибольших допустимых напряжений прикосновения от времени действия тока. 1 — СССР [Л. 1]; 2 — ВНР [Л. 2]; 3 — ПНР и ЧССР [Л. 3 и 4]; 4 — ПНР [Л. 5]; 5 — ГДР [Л. 6]; 6 — Швейцария [Л. 7]; 7 — ФРГ [Л. 8]; 8 — Австралия [Л. 9]; 9 — США [Л. 10].

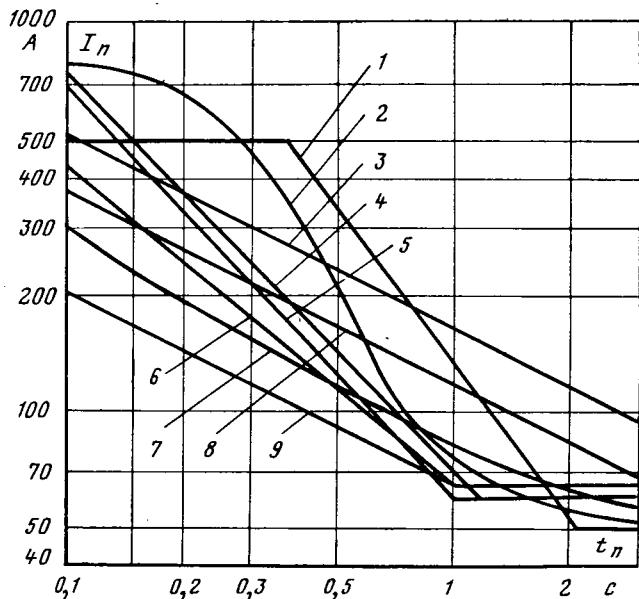


Рис. 2. Зависимости предельных поражающих токов от времени действия тока. 1 — по [Л. 11]; 2 — по [Л. 12]; 3 — по [Л. 13]; 4 — по [Л. 14]; 5 — по [Л. 15]; 6 — по [Л. 16]; 7 — по [Л. 17]; 8 — по [Л. 18]; 9 — по [Л. 19].

При разработке стандартов, предписаний и отечественных рекомендаций чаще всего опирались на зависимости  $I_p = f(t_p)$  [Л. 13, 15, 18, 19]. Это зависимости, разработанные в большинстве случаев до 1963 г. В статьях, опубликованных после 1970 г. [Л. 7 и 11], содержатся возражения на интерпретацию результатов исследований, по которым были получены эти зависимости, и предложена другая интерпретация результатов. Поскольку эти предложения не были еще повсеместно одобрены и значительно отличались от новейших рекомендаций [Л. 20], авторы проекта стандарта СЭВ приняли за основу для определения наибольших допустимых напряжений следующую зависимость токов от времени поражения, являющуюся компромиссным решением между широко признаваемыми рекомендациями и [Л. 7 и 11]. Такое решение было принято при разработке временной нормы СССР [Л. 1].

Время поражения, с 0,1 0,2 0,3 0,5 0,7 1 2 3 5  
Предельный ток по-500 400 312 197 137 96 69 65 65  
ражения, мА

Сопротивление тела человека изменяется в очень широких пределах и зависит не только от индивидуальных свойств человека, но и от следующих факторов: пути протекания тока, влажности кожи, площади контактной поверхности, времени протекания тока, напряжения прикосновения или шага.

Анализ проведенных до настоящего времени исследований позволяет установить, что для нормирования защиты от поражения можно принимать значения сопротивления тела человека, измеренные на пути рука — рука или рука — ноги, для увлажненной потом или водой, при использовании электродов с большой поверхностью. Статистический анализ измерений сопротивления тела человека показал несимметричное распределение с большой положительной асимметрией [Л. 24 и 25]; следовательно, значение этого сопротивления должно представлять собой нижний предел из наиболее вероятных в рассматриваемых условиях значений.

В [Л. 24] предложено принимать обобщенное модельное сопротивление тела человека при напряжениях прикосновения или шага до 50 В, равное 2 кОм, от 50 до 250 В — использовать зависимость:

$$Z_t = 10^{1,08} / U^{0,46}.$$

Эта зависимость для мокрого состояния и квантиля 10%-ной вероятности в значительной степени совпадает с зависимостью, принятой МЭК [Л. 20].

Для определения наибольших допустимых напряжений прикосновения авторы стандарта СЭВ использовали зависимость сопротивления тела человека от напряжения, показан-

ную на рис. 3 и полученную на основе рекомендаций [Л. 24] (для напряжений до 250 В) и МЭК (для более высоких напряжений) для сопротивления, измеренного на пути рука — рука или рука — нога, состояния мокрой и большой поверхности электрородов.

**Вероятность поражения человека электрическим током.** В настоящее время повсеместно признается, что степень опасности поражения, а тем самым критерии объема и оценки эффективности защиты от поражения можно оценивать вероятностными методами [Л. 1, 3—5 и др.].

Строгий подход к влиянию вероятности смертельного поражения человека на критерии определения объема средств защиты требует вычисления вероятности одновременного наличия двух независимых событий: попадания человека под напряжение и наличия такого физического состояния человека, при котором это напряжение вызывает фибрилляцию желудочков сердца. Вероятность каждого из этих событий является результатом одновременного наличия многих очередных событий. Поэтому определение вероятности поражения человека, учитывающее все события, влияющие на смертельный исход, является сложной задачей. До настоящего времени были сделаны только попытки решения такой задачи [Л. 26 и 27], а полученные результаты не могут еще быть основой для обобщений.

При определении наибольших допустимых напряжений прикосновения для проекта стандарта СЭВ было принято, что у человека, который очутился под напряжением до прикосновения, вероятность появления такого физического состояния, при котором напряжение вызывает фибрилляцию желудочков сердца, равна 1. Дифференцирована же вероятность показания человека под напряжение до прикосновения с учетом вероятности нахождения человека в опасном месте, а также его квалификации, выражаящейся в том, осознает ли он или нет последствия прикосновения к предметам, на которых может появиться опасное напряжение.

Пренебрежение другими факторами,ющими влиять на вероятность попадания человека под напряжение, было вызвано трудностями в их учете; однако это пренебрежение допустимо, так как только повышает значение основного критерия определения объема дополнительных мер защиты.

С учетом перечисленных факторов были установлены области с различной (численно невыраженной) плотностью движения, а также области, находящиеся вне и внутри электроустановок. Каждой области присвоена одна из трех зависимостей наибольших допустимых напряжений прикосновения  $U_{np}$  от времени поражения  $t_n$ . Зависимость  $U_{np}=f(t_n)$ .

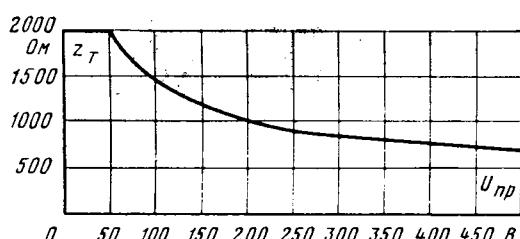


Рис. 3. Зависимость сопротивления тела человека от напряжения прикосновения.

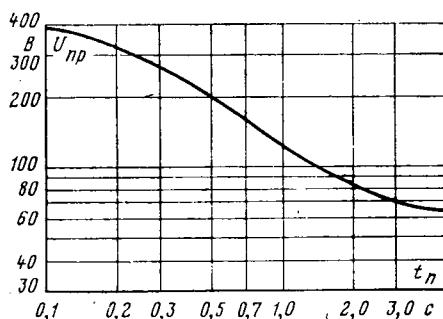


Рис. 4. Зависимость наибольшего допустимого напряжения от времени действия тока для области с первой степенью защиты от поражения электрическим током.

предъявляющую к дополнительным мерам защиты наиболее высокие требования (первая степень требуемой защиты), принятая для областей с большой плотностью движения, в которых преимущественно находятся люди без знаний о защите от поражения электрическим током: территории сплошной застройки городов, поселков и деревень, спортивных объектов, промышленных предприятий, площади, здания и т. д. К таким областям отнесены также помещения на подстанциях и электростанциях, где особо опасные условия обусловлены высокой температурой, влажностью и т. п.

Зависимость  $U_{np}=f(t_n)$ , предъявляющая к дополнительным мерам защиты менее строгие требования (вторая степень требуемой защиты), принятая для участков территории шириной 10 м, смежных с областями для электроустановок, для которых требуется первая степень защиты, а также для мест в электроустановках, где производятся ремонтно-монтажные работы, на дорогах кольцевого движения и переходах, в помещениях распределительных устройств электростанций.

Зависимость  $U_{np}=f(t_n)$ , предъявляющую к дополнительным мерам защиты от поражения электрическим током наименьшие требования (третья степень требуемой защиты), принятая на территориях шириной 10 м вне областей электроустановок, для которых требуется вторая степень защиты, но смежных с ними.

**Наибольшие допустимые напряжения прикосновения.** Зависимость наибольших допустимых напряжений прикосновения от времени поражения для территорий, на которых существует наибольшая вероятность поражения человека (первая степень защиты), получена из приведенной зависимости предельных поражающих токов от времени поражения, а также в зависимости сопротивления тела человека от напряжения прикосновения (рис. 3). Эта зависимость была затем корректирована в диапазоне времени, большем 1 с, так, чтобы после 5 с значения наибольших допустимых напряжений прикосновения не превышали 65 В, т. е. соответствовали значениям, принятым в большинстве стандартов по дополнительным мерам защиты от поражения электрическим током в электроустановках с номинальными напряжениями менее 1 кВ (рис. 4).

Значения наибольших допустимых напряжений прикосновения для второй и третьей степеней защиты приняты соответственно в два и три раза больше значений для первой степени защиты. Произведения значений наибольших допустимых напряжений прикосновения для различных степеней защиты соответствуют принятым в постановлениях действующих в настоящее время стандартов в некоторых странах [Л. 4, 5 и 27].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бургсдорф В. В., Беляев А. С., Королев С. П. и др. Об изменении норм на заземляющие устройства электроустановок напряжением выше 1000 В с заземленной нейтралью. — Электрические станции, 1975, № 3.
2. Erintésréteimi előirások 1000 V-nál nagyobb feszültséggel berendezések számára. — MSZ 172/2...4, Budapest, 1976.
3. Zarządzenie MGiE oraz MBiPMB z dnia 5.10.1966 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinna odpowiadać ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektroenergetycznych o napięciu wyższym niż 1 kV. — Dziennik Budownictwa, 1966, № 17.
4. Všeobecné předpisy o ochraně před nebezpečným dotykovým napětím. — ČSN 341010, Schwäbena 26.06.1965.
5. STAS 7334—78. Instalații electrice de 1 kV și neste 1 kV. — Instalații de legare la pamint de prescripte. — București, 1978.
6. TGL 200—0603/03. Erdung in elektrischen Anlagen. Starkstromanlagen. Fachbereichstandart, 1974, Mai.
7. Biegelmeier G. Einige neue Erkenntnisse betrifftend die Technik des Berührungsspannungsschutzes in Niederspannungsanlagen. — Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, 1972, № 12.
8. VDE 0141/7.76. Bestimmungen für Erdung in Wechselstromanlagen für Nennspannungen über 1 kV.
9. Swan G. A. H., McRae B. P. The Earthing of High Voltage Substations. — Reprint of Paper Published in the Electrical Engineering of the Institution of Engineers Australia, 1966, March.
10. IEEE Guide for Safety in Substation Grounding. — IEEE Std. 80, 1976.
11. Biegelmeier G., Rotter K. Elektrische Widerstände und Ströme in menschlichen Körpern. — E und M, 1971, N. 3.

12. A—C Shock of Varying Parameters Affecting the Heart/ Kouwenhoven W. B., Knickerbocker G. G., Chesnut R. W. e. a. — TAIEE, 1959, P. I, vol. 78.

13. Dalziel C. F. Threshold 60—Cycle Fibryllating Currents. — Conference Paper AIEE, 1960.

14. Koepen S., Tolazzi H. Elektrounfälle und ihre Einflusse aus medizinischer Sicht. — ETZ-B, 1966, Bd 18, H. 6.

15. Osypka P. Messtechnische Untersuchungen über Stromstärke. Einwirkungen und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier. Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen. — Elektromedizin und ihre Grenzgebiete, 1963, Bd 8, H. 3.

16. Киселев А. П. Первичные критерии безопасности электрического тока промышленной частоты. — Вроцлав: изд-во Вроцлавского политехнич. ин-та, 1968.

17. Effects of Current Passing Through the Human Body — IEC — Publication 479, 1974.

18. Dalziel C. F., Lee P. Reevaluation of Lethal Electric Currents. — IEEE Trans. on Industrial and General Applications, 1968, vol. 4, № 5, 6.

19. International Labour Office Meeting of Experts on Electrical Accidents and Related Matters. — Geneva, 1962.

20. Thielen H. Wirkungsbereichen von Körperströmen und ihre Rückwirkungen auf Schutzmassnahmen. — ETZ-B, 1974.

21. Über Messungen des elektrischen Widerstandes der Körper lebender Menschen in Zusammenhang mit Normungsfragen bei den Schutzmassnahmen gegen elektrische Unfälle in Niederspannungsanlagen/ Biegelmeier G., Hönniger E., Küttner J. u. a. — E und M, 1979, H. 2.

22. Teresiak Z. Podstawowe kryteria wymiarowania skutecznosci ochrony przeciwporazeniowej. — Konferencja naukowo-techniczna «Ochrona przeciwporazeniowa w urzadzeniach elektroenergetycznych o napięciu ponad 1 kV». — Wrocław, 1975.

23. Küttner I., Bartussek W. Messungen der Körperwiderstände an lebenden Personen. — E und M, 1978, H. 1.

24. Teresiak Z. Modelowe opory ciała ludzkiego w technice ochrony przeciwporazeniowej. — Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej. Elektryka XXXV, 1968, № 196.

25. Biegelmeier G. Über die statistische Auswertung von elektrophysiologischen Experimenten. — E und M, 1979, H. 2.

26. Якоб А. И., Королев С. П., Коструба С. И. Оценка уровня электробезопасности и новые нормы на характеристики заземляющих устройств электроустановок с большими токами замыкания на землю. — Электричество, 1975, № 2.

27. Kärkkäinen S., Palva V. Application of Probability Calculation to the Study of the Earthing Voltage Requirements for Electrical Safety Codes. — Electricity in Finland, 1974, № 11.

[27.07.79]

УДК 621.318.34:538.6

## О проницаемости тел, находящихся в намагничиваемых средах

АФАНАСЬЕВ Ю. В.

В соответствии с [Л. 1] магнитные свойства тел конечных размеров по отношению к намагничивающему их внешнему полю вектора  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}_0$ , где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $H_0 = H_e$  — напряженность поля, обусловленная существованием макроскопических (свободных) токов  $^1$ , характеризуются тензором  $\mu^*$ , называемым относительной магнитной проницаемостью тела. Смысль введения понятия «проницаемость тела» заключается в том, чтобы учитывая анизотропию формы тела, связать вектор внутреннего поля  $\vec{B}_i$  с вектором намагничивающего поля  $\vec{B}_0$ :

$$\vec{B}_i = \mu^* \vec{B}_0. \quad (1)$$

Остановимся кратко на основных положениях [Л. 1]. Поместим эллипсоид, заполненный изотропным веществом с относительной магнитной проницаемостью  $\mu = \mu_i$ , в однородное поле вектора  $\vec{B}_0$ , причем так, чтобы одна из его осей, например большая, оказалась параллельной  $\vec{B}_0$ . Тогда можно записать:

$$H_i = H_e - H_J, \quad (2)$$

где  $H_i$  — напряженность внутреннего поля (согласно [Л. 1] «непосредственный возбудитель магнетизма в теле»);  $H_J$  — напряженность дополнительного поля, направленного внутри тела при  $\mu_i > 1$  навстречу внешнему и потому называемого также размагничивающим полем (см. рис. 1, а).

Поскольку

$$B_i = \mu_0 \mu_i H_i = \mu_0 \mu^* H_e, \quad (3)$$

где  $\mu_i$  — относительная магнитная проницаемость вещества предполагается изотропной, заполняющей тело, то с учетом (2) имеем

$$\mu^* = \frac{\mu_i H_i}{H_i + H_J}. \quad (4)$$

Напряженность размагничивающего поля пропорциональна коэффициенту размагничивания и намагниченности тела, т. е.  $H_J = NJ$ . При этом, если намагниченность  $J$  является функцией  $H_i$ , то

$$H_J = NJ = N(\mu_i - 1)H_i, \quad (5)$$

<sup>1</sup> Здесь и далее используем индексы:  $e$  — external (внешний);  $i$  — internal (внутренний); 0 — вакуум.

где  $N$  — коэффициент размагничивания тела в соответствующем направлении.

Подставляя (5) в (4), находим

$$(\mu^*)_0 = \frac{\mu_i}{1 + N(\mu_i - 1)}. \quad (6)$$

(Это выражение и было получено в [Л. 1].)

Формула (6) справедлива только для случая, когда тело находится в вакууме. На ограниченность формулы (6) обращалось внимание, например в [Л. 2]. Явно неудачная попытка обобщить аналогичную (6) формулу для диэлектрической проницаемости тела предпринята в [Л. 3].

Ниже дается простой вывод обобщенной формулы, распространяемой на случай нахождения тел в намагничиваемых средах ( $\mu_e \neq 1$ ), удовлетворяющей соотношению (1). Поместим эллипсоид, заполненный изотропным веществом с относительной проницаемостью  $\mu_i$ , в изотропную среду, например, в магнитную жидкость с относительной проницаемостью  $\mu_e$ . Большую ось эллипсоида, как и ранее, ориентируем параллельно вектору  $\vec{B}_e = \mu_e \vec{B}_0$ , а следовательно, и вектору  $\vec{B}_0$  (см. рис. 1, б).

Рассмотрим случай, когда проницаемость среды приблизительно равна проницаемости вещества, заполняющего эллипсоид, т. е. когда  $\mu_e \approx \mu_i$ . В этом случае  $H_e \approx H_i$ , а следовательно, в соответствии с (2) и  $H_J \approx 0$ . Однако последнее приближение не может быть связано ни с устремлением к нулю коэффициента  $N$  (в эллипсоиде этот коэффициент зависит только от отношения его полусей), ни с устремлением к нулю намагниченности, поскольку  $J = f(H_i)$  и  $H_i \neq 0$  даже приближенно. Поэтому остается предположить, что в общем случае напряженность дополнительного (размагничивающего) поля должна определяться не через истинную, а через кажущуюся намагниченность  $J'$ :

$$H_J = NJ' = N \left( \frac{\mu_i}{\mu_e} - 1 \right) H_i. \quad (7)$$

Из (7) видно, что при  $\mu_e \approx \mu_i$  приближение  $H_J \approx 0$  имеет место потому, что  $(\mu_i/\mu_e - 1) \approx 0$ . Если  $\mu_e < \mu_i$ , то дополнительное поле направлено навстречу внешнему; если  $\mu_e > \mu_i$ , то оно совпадает по направлению с внешним полем. При  $\mu_e = 1$ , независимо от значения  $\mu_i$ , выражение (7) переходит в (5).

Подставляя (7) в (4), получаем наиболее общее выражение для проницаемости тела:

$$\mu^* = \frac{\mu_i}{1 + N \left( \frac{\mu_i}{\mu_e} - 1 \right)}. \quad (8)$$

В несколько иной форме записи эта формула приведена (хотя и без вывода) в [Л. 4]. Из (8) следует, что магнитная проницаемость тела зависит не только от его формы и проницаемости вещества, заполняющего тело, но и от магнитной проницаемости окружающей среды.

Используя (8), оценим степень влияния проницаемости окружающей среды  $\mu_e$  на проницаемость тела  $\mu^*$  при различных значениях  $\mu_i$  и  $N$ .

На рис. 2, а и б приведены зависимости  $\mu^*(\mu_e)$  для различных  $N$  при  $\mu_i = 10^4$  и  $\mu_i = 10^2$  соответственно. Из рис. 2 видно, что влияние  $\mu_e$  на  $\mu^*$  тем сильнее, чем выше значения  $\mu_i$  и  $N$ . Наибольшее влияние имеет место в диапазоне изменений  $\mu_e$  от 1 до значения, равного  $\mu_i$ . Кривые, изображающие зависимости  $\mu^*(\mu_e)$  для различных  $N$  пересекаются в одной точке там, где  $\mu_e = \mu_i$ . При  $\mu_e \gg \mu_i$  эти зависимости приближаются к своим предельным значениям:

$$\lim_{\mu_e \rightarrow \infty} \mu^* = \frac{\mu_i}{1 - N}. \quad (9)$$

Предельные значения  $\mu^*$  достигаются тем быстрее, чем меньше  $\mu_i$  и  $N$ .

На рис. 3 приведены аналогичные зависимости для случая, когда  $\mu_i = 1$ . Случай характерен тем, что понятие «проницаемость тела» распространяется здесь на полость в среде<sup>2</sup>. Из рис. 3 видно, что в диапазоне изменений  $N$  от  $1/3$  (полость, ограниченная сферой) до 0,99 (узкая щель) влияние  $\mu_e$  на  $\mu^*$  весьма значительно.

На основе (1), (3) и (8) можно найти как вектор  $\vec{H}_i$ , так и вектор  $\vec{B}_i$  при любых значениях  $N$ ,  $\mu_i$  и  $\mu_e$ . Так, для шара ( $N = 1/3$ ) сразу же находим:

$$\vec{H}_i = \frac{\mu^*}{\mu_i} \vec{H}_e = \frac{3\mu_e}{2\mu_e + \mu_i} \vec{H}_e;$$

$$\vec{B}_i = \mu^* \vec{B}_e = \frac{3\mu_e \mu_i}{2\mu_e + \mu_i} \vec{B}_e.$$

Заметим, что в [Л. 2] первое из этих выражений получено в результате применения теории потенциала.

Из (8) следует также, что характерными предельными значениями  $\mu^*$  в зависимости от формы тела будут:

$$\lim_{N \rightarrow 0} \mu^* = \mu_i; \quad (10a)$$

$$\lim_{N \rightarrow 1} \mu^* = \mu_e. \quad (10b)$$

Случай (10a) характерен тем, что проницаемость тела  $\mu^*$  уже не зависит от проницаемости окружающей среды  $\mu_e$ . Зная  $\mu_i$  и непосредственно измеряя  $B_i$  в соответствии с (1) сразу же получаем информацию о значении намагничивающего поля  $B^0$ . Случай (10b), напротив, характерен тем, что  $\mu^*$  здесь не зависит от  $\mu_i$ . Измерив  $B_i$ , сразу же получаем информацию о значении поля  $B_e = \mu_e B^0$ , не зная значений каждого из множителей в отдельности. Используя для измерительных целей оба предельных перехода и разделив полученные значения одно на другое, т. е.  $B_e$  на  $B^0$ , можно получить информацию и о значении  $\mu_e$ , во многих случаях остающимся неизвестным.

Необходимо отметить, что описанный выше способ нахождения  $\mu_e$  мало пригоден для практики. Очень трудно создать магнитометрические преобразователи (датчики), форма которых с достаточно высокой точностью удовлетворяла бы предельным значениям проницаемости тела (10a) и (10b). Так, из кривых, приведенных на рис. 3, видно, что даже при  $N = 0,99$  значение  $\mu^*$  существенно отличается от значения  $\mu_e$ . Поэтому может оказаться полезным иной способ нахождения  $\mu_e$ , который связан не с предельными переходами (10a) и (10b), а с изменением параметров  $\mu_i$  или  $N$  выражения (8) при постоянном  $B^0$  ( $B^0 = \text{const}$ ).

<sup>2</sup> В соответствии с (7) коэффициент  $N = dH_j/dJ'$ . Поскольку  $dH_j/dJ' \neq 0$  и тогда, когда  $J' = 0$  и  $H_j = 0$ , то к полости так же применимо понятие «коэффициент размагничивания», как и к сплошным телам.

Составив на основе (1) и (8) две системы уравнений (соответственно для измеряемых параметров  $\mu_e$  и  $N$ ), находим:

$$\mu_e = \frac{\mu_1 \mu_2 N (B_1 - B_2)}{(\mu_1 B_2 - \mu_2 B_1) (1 - N)}; \quad (11)$$

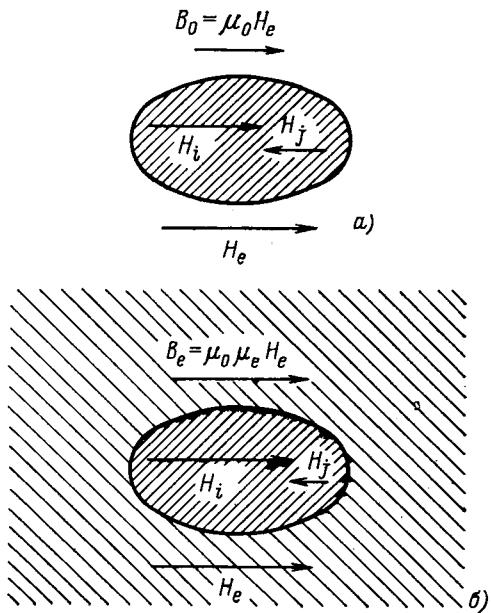


Рис. 1. Эллипсоид, заполненный веществом с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_i > 1$ , в однородном поле вектора  $\vec{B}_0$  (а) и в однородном поле вектора  $\vec{B}_e$  (б).

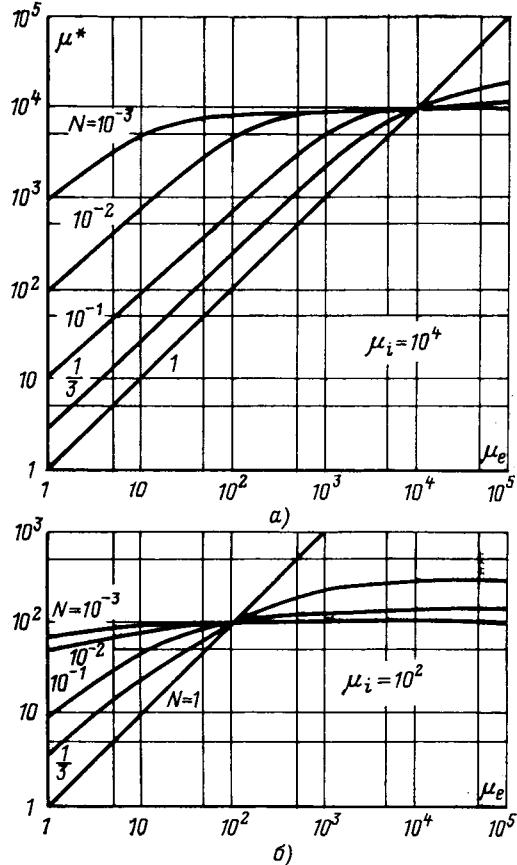


Рис. 2. Зависимость  $\mu^*(\mu_e)$  для различных значений  $N$  при  $\mu_i = 10^4$  (а) и  $\mu_i = 10^2$  (б).

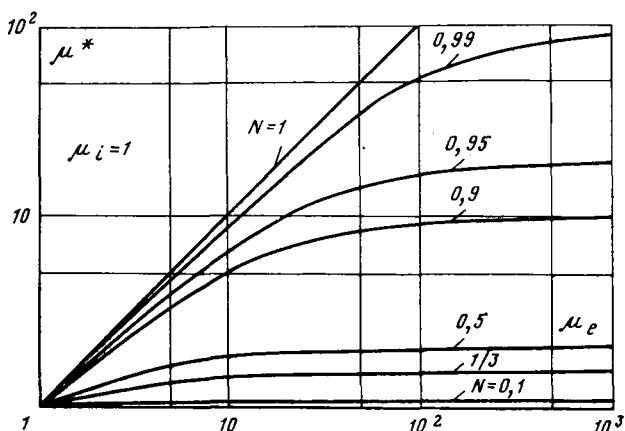


Рис. 3. Зависимости  $\mu^*(\mu_e)$  для различных значений  $N$  при  $\mu_i = 1$ .

$$\mu_e = \frac{\mu_i (N_1 B_1 - N_2 B_2)}{B_2 (1 - N_2) - B_1 (1 - N_1)}, \quad (12)$$

где  $\mu_i$  и  $\mu_2$  — значения изменяемой проницаемости вещества  $\mu_i$ , заполняющего тело;  $N_1$  и  $N_2$  — значения изменяемого коэффициента  $N$  при деформации тела;  $B_1$  и  $B_2$  — значения  $B_i$ , которым пропорциональны выходные сигналы магнитометрического преобразователя.

Заметим, что изменение проницаемости вещества тел (сердечников магнитометрических преобразователей) легко обеспечивается за счет постоянного или переменного тока, подаваемого в обмотки, окружающие сердечник, если последний выполнен из магнитно-мягкого материала типа пермаллоя<sup>3</sup>. Изменение коэффициента размагничивания сердечников может быть достигнуто, например, за счет акустического воздействия.

Таким образом, видим, что формула (8) позволяет не только упростить расчеты и установить адекватность получаемой при измерении информации действительным величинам, но и исследовать возможность нахождения магнитной проницаемости окружающей среды за счет воздействия на магнитные и геометрические параметры сердечников магнитометрических преобразователей, помещаемых в эту среду.

<sup>3</sup> Нахождение  $\mu_e$  по формуле (11) практически осуществимо лишь в том случае, когда сердечник преобразователя имеет форму эллипсоида.

В заключение отметим, что если окружающая среда изотропна, то вместо (1) можно записать

$$\vec{B}_i = \vec{v}^* \vec{B}_e, \quad (13)$$

где

$$v^* = \frac{\mu^*}{\mu_e} = \frac{\mu_i/\mu_e}{1 + N \left( \frac{\mu_i}{\mu_e} - 1 \right)}. \quad (14)$$

При  $\mu_e = 1$  формула (14), равно как и (8), переходит в (6). Может возникнуть вопрос: какая же из этих двух формул, а именно, (8) или (14) является обобщением (6) и более правильно отражает смысл понятия «проницаемость тела»? Ответ получится, если учтем, что умножение левой и правой частей формулы (8) на постоянную  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м дает значение абсолютной магнитной проницаемости тела (что может быть использовано, например, при расчете индуктивности обмотки, окружающей тело); в то же время умножение левой и правой частей формулы (14) на  $\mu_0$  лишено какого-либо содержания. Поэтому проницаемостью тела следует считать величину  $\mu^*$ , а не  $v^*$ , которая не только по размерности, но и по физическому смыслу является величиной относительной<sup>4</sup>. Наконец, не следует преувеличивать и практическую значимость выражения (13). При осуществлении обратных магнитоизмерительных преобразований, связанных с воспроизведением магнитного поля [Л. 5], контролируемым параметром является именно величина  $B_0$ , а не  $B_e$ . Все сказанное в настоящей статье может быть распространено и на понятие «диэлектрическая проницаемость тела».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. 4.1. — М.—Л.: ОНТИ, 1934.
- Поливанов К. М. Ферромагнетики. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1957.
- Нестеренко А. Д. Введение в теоретическую электротехнику. — Киев: Наукова думка, 1969.
- Lowes F. J. Do magnetometer measure  $B$  or  $H$ ? — Geophys. J. R. Astr. Soc., 1974, № 37.
- Средства измерений параметров магнитного поля/ Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев, Е. Н. Чечурина, А. П. Щелкин — Л.: Энергия, 1979.

{07.06.79}

<sup>4</sup> Величина  $v^*$  характеризует относительную плотность магнитного потока в теле.

УДК 538.245.018.782.3.001.24

## О влиянии вихревых токов на переходные процессы в устройствах с кольцевыми сердечниками из ферромагнитной ленты

ПЕККЕР Д. И.

Новочеркасск

Как указывается в [Л. 1 и 2] при расчете сердечников из весьма тонких лент можно пренебречь влиянием вихревых токов (оно мало по сравнению с влиянием магнитной вязкости). Оценка влияния вихревых токов обычно производится для идеально прямоугольной петли гистерезиса при изменении индукции или напряженности магнитного поля по заранее заданному закону (синусоидальному, линейному, прямоугольному).

Представляет интерес расчет вихревых токов в кольцевых сердечниках из тонкой пермаллоевой ленты, когда закон изменения напряженности магнитного поля определяется как результат взаимодействия процессов, протекающих в самом сердечнике и в обмотках, расположенных на нем, при учете конечной величины магнитной проницаемости материала сердечника.

Ниже приводится пример такого расчета для дросселя,

включенного на постоянное напряжение. Задача формулируется следующим образом. Заданы статическая петля гистерезиса сердечника, аппроксимированная четырьмя участками прямой, дифференциальная магнитная проницаемость на пологих участках  $\mu_p$  и на крутых  $\mu_k$ , причем  $\mu_k \gg \mu_p$ ;  $\sigma$  — электропроводность материала сердечника;  $l$ ,  $S$  — длина средней линии и сечение сердечника;  $2a$ ,  $2b$  — толщина и ширина ленты сердечника;  $w$ ,  $r$  — число витков и сопротивление обмотки;  $u$  — напряжение, прикладываемое к обмотке.

Требуется найти законы изменения тока в обмотке и потока в сердечнике с учетом вихревых токов.

В [Л. 3] приведено выражение, определяющее законы изменения тока в обмотке и потока в металлическом стержне прямоугольного сечения при ступенчатом изменении напряженности магнитного поля, справедливое и для кольцевого сердечника, у которого радиус кольца намного больше размеров

поперечного сечения:

$$\Phi = \Phi(0) \left\{ 1 - \frac{64}{\pi^4} \sum_{n, m} \frac{e^{[(2n-1)^2 + (2m-1)^2 k^2] \theta t}}{(2n-1)^2 (2m-1)^2} \right\}, \quad (1)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $m = 1, 2, 3, \dots$ ;  $k = \frac{a}{b}$ ;

$$\theta = \frac{\pi^2}{4a^2 \mu_0}; H = \frac{iw}{l}; \Phi(0) = \mu_0 H S;$$

$\Phi$ ,  $\Phi(0)$  — текущее и установившееся значения потока в сердечнике;  $H$ ,  $i$  — текущие значения напряженности магнитного поля, создаваемой обмоткой, и тока в обмотке.

Уравнение электрической цепи дросселя

$$u = ir + wS \frac{dB}{dt}, \quad (2)$$

где  $B$  — индукция в сердечнике;  $t$  — время.

Можно показать, что так как  $\mu_0 \ll \mu_k$ , то влиянием вихревых токов на пологом участке петли можно пренебречь. При этом условии для пологого участка уравнение (2) преобразуется к виду

$$\frac{dB}{dt} + B \frac{lr}{\mu_0 S w^2} = \frac{B_r lr}{\mu_0 w^2 S} + \frac{u}{wS}, \quad (3)$$

где  $B_r$  — остаточная индукция.

Считая, что в момент включения напряжения магнитное состояние сердечника определялось точкой  $B_r$ , решение этого уравнения найдем в виде

$$B = A_0 + (B_r - A_0) e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4)$$

где

$$A_0 = B_r + \frac{uw}{lr} \mu_0; \tau = \frac{\mu_0 S w^2}{lr}.$$

Соответственно закон изменения тока в обмотке запишем как

$$i = \frac{u}{r} + \frac{w}{r} S (B_r - A_0) \frac{e^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau}. \quad (5)$$

Для определения законов изменения магнитного потока и тока при перемагничивании сердечника на кругом участке петли гистерезиса введем понятие переходной магнитной проводимости при единичном скачке напряженности магнитного поля. Используя выражение (1), ее можно определить как

$$A(t) = \mu_0 S \left\{ 1 - \frac{64}{\pi^4} \sum_{n, m} \frac{e^{-[(2n-1)^2 + (2m-1)^2 k^2] \theta t}}{(2n-1)^2 (2m-1)^2} \right\}. \quad (6)$$

Для определения приращения магнитного потока воспользуемся интегралом Диоамеля [Л. 4]:

$$\Delta \Phi(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t \Delta H(t) A(t-\tau) d\tau, \quad (7)$$

где  $\Delta H(t)$  — мгновенное значение приращения напряженности магнитного поля, создаваемое приращением тока в обмотке.

Из уравнения (2) находим

$$\Delta i(t) = \frac{w}{r} \left[ \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)_0 - \frac{d\Phi}{dt} \right], \quad (8)$$

где  $\left( \frac{d\Phi}{dt} \right)_0$  — значение производной потока, соответствующее концу процесса перемагничивания сердечника по пологому участку петли гистерезиса.

Из (8) следует, что

$$\Delta H(t) = \frac{w^2}{rl} \left[ \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)_0 - \frac{d\Phi}{dt} \right]. \quad (9)$$

Подставляя в уравнение (7) выражения соответствующих величин из равенств (6) и (8) и переходя к операторной форме, получаем

$$\Delta \Phi(p) = \frac{U(p)}{pW(p)}. \quad (10)$$

Используя теорему разложения Хевисайда, найдем закон изменения приращения потока во времени:

$$\Delta \Phi(t) = \frac{U(0)}{W(0)} + \sum_{i=1}^q \frac{U(p_i)}{p_i W(p_i)} e^{p_i t}, \quad (11)$$

где

$$U(p) = N \left[ 1 - p \frac{64}{\pi^4} \sum_{n, m} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{\{p + [(2n-1)^2 + (2m-1)^2 k^2] \theta\} (2n-1)^2 (2m-1)^2} \right];$$

$$W(p) = 1 + M \left[ p + p^2 \frac{64}{\pi^4} \sum_{n, m} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{\{p + [(2n-1)^2 + (2m-1)^2 k^2] \theta\} (2n-1)^2 (2m-1)^2} \right];$$

$$W'(p) = M \left[ 1 - 2p \frac{64}{\pi^4} \sum_{n, m} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{\{p + [(2n-1)^2 + (2m-1)^2 k^2] \theta\} (2n-1)^2 (2m-1)^2} + \right. \\ \left. + p^2 \frac{64}{\pi^4} \sum_{n, m} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{\{p + [(2n-1)^2 + (2m-1)^2 k^2] \theta\} (2n-1)^2 (2m-1)^2} \right];$$

$$N = \frac{w^2}{rl} \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)_0 S; M = \frac{w^2}{rl} \mu_k S,$$

$q$  — число корней уравнения  $W(p) = 0$ .

Из (2) и (11) найдем закон изменения тока во времени:

$$i(t) = \frac{u}{r} - \frac{w}{r} \sum_{i=1}^q \frac{V(p_i)}{W(p_i)} e^{p_i t}. \quad (12)$$

По полученным соотношениям были рассчитаны законы изменения потока и тока в дросселе, выполненным на сердечнике марки 79НМ и имеющем следующие параметры:  $S = 10^{-5} \text{ м}^2$ ;  $l = 0,07065 \text{ м}$ ;  $a = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $b = 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  $\mu_0 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Г/м}$ ;  $\mu_k = 0,31 \text{ Г/м}$ ;  $B_r = 0,6 \text{ Т}$ ;  $B_{\text{п.к}} = 0,598 \text{ Т}$ ;  $\sigma = 1,82 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ ;  $H_c = 1,5 \text{ А/м}$ . При  $w = 60$ ,  $r = 70,6 \text{ Ом}$  и  $u = 8$  В расчетное значение напряженности магнитного поля при индукции, равной нулю, составляло  $H_p = 8,20 \text{ А/м}$ , а соответствующее экспериментальное значение  $H_{\text{эксп}} = 11,9 \text{ А/м}$ . Для того же сердечника, при той же величине приложенного напряжения, но при  $w = 160$ ,  $r = 188 \text{ Ом}$  было получено  $H_p = 7,02 \text{ А/м}$ , а  $H_{\text{эксп}} = 6,95 \text{ А/м}$ , т. е. расхождение между ними не превышало погрешности эксперимента.

На основании изложенного следует сделать вывод, что при толщине пермалловой ленты, равной 50 мкм, при одних режимах перемагничивания влияние магнитной вязкости по сравнению с влиянием вихревых токов весьма мало и им можно пренебречь. В других же случаях неучет магнитной вязкости может привести к заметной погрешности расчета.

## Постановлением от 23 января 1980 г.

### Президиум Всесоюзного Совета Научно-технических обществ одобрил публикуемые ниже Рекомендации по организации работы общественных научно-исследовательских институтов (лабораторий, групп).

В Приветствии ЦК КПСС V Всесоюзному съезду НТО поставлена задача: «Совершенствовать работу действующих на общественных началах институтов и лабораторий, бюро экономического анализа и технической информации, советов научной организации труда».

В настоящее время на предприятиях, в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях, производственных и научно-производственных объединениях, колхозах и совхозах создано около 11 тыс. общественных научно-исследовательских институтов, лабораторий и групп (ОНИИ, ОНИЛ, ОНИГ). В их деятельности принимают участие свыше 120 тыс. ученых, инженеров, техников, служащих, рабочих-новаторов производства. Сотрудники ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) ежегодно выполняют более 30 тыс. работ, внедрение которых дает значительный экономический эффект.

Свыше 10 лет успешно работают научно-исследовательские институты Шосткинского производственного объединения «Свемаз», Ровенского льнокомбината имени Комсомола Украины, Октябрьской железной дороги, института «Гипроречтранс», ОНИИ Белорусского республиканскогоправления НТО легкой промышленности и др.

**Общие положения.** Общественные научно-исследовательские институты (лаборатории, группы) являются одной из форм общественных творческих объединений трудящихся. Постановлением Президиума ВЦСПС от 16 мая 1969 г. руководство деятельностью ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) возложено на научно-технические общества. Общественные институты (лаборатории, группы) работают, руководствуясь «Гиповым положением об общественном научно-исследовательском институте (лаборатории, группе) на предприятии», утвержденным постановлением президиума ВСНТО от 25 декабря 1969 г.

Методическое руководство ОНИИ осуществляют комиссии и комитеты по новой технике или смотровые комиссии по проведению смотров выполнения планов новой техники при республиканских, краевых и областныхправлениях НТО.

Работа ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) должна быть направлена на улучшение конечных результатов хозяйственной деятельности объединений, предприятий, организаций, колхозов, совхозов, усиление интеграции науки и производства. Задачами ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) являются: проведение научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, внедрение их результатов по вопросам технического развития, сокращения сроков проектирования новых технических средств и освоения их в производстве, повышения производительности труда, механизации и автоматизации производственных процессов, выпуска высококачественной продукции, изыскания и улучшения использования резервов, ликвидации потерь на производстве.

Приведенная методика позволяет оценить влияние вихревых токов на динамические характеристики сердечников, работающих в той или иной схеме. В тех случаях, когда влияние вихревых токов преобладает, расчет переходных процессов может быть построен с использованием статической петли гистерезиса. В противном случае необходимо использовать экспериментальные динамические петли гистерезиса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенблат М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. — М.: Наука, 1974.

Кроме того, задачами ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ), созданных в колхозах и совхозах, следует считать также разработку практических мероприятий по внедрению научно обоснованной системы ведения сельского хозяйства, улучшению использования техники, эффективному применению удобрений и средств защиты растений.

**Порядок создания и структура ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ).** ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) создаются по инициативе советов первичных организаций НТО по согласованию с администрацией, партийными и профсоюзными комитетами. Они могут организовываться также на базе республиканских и областных правлений НТО или нескольких предприятий, научно-исследовательских институтов и проектно-конструкторских организаций.

В соответствии с § 100 Положения о государственном социалистическом производственном предприятии совет первичной организации НТО может обращаться к администрации с предложением о выделении ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) помещений, инвентаря, оборудования, приборов, технической и справочной литературы и т. д.

Оперативное руководство и контроль за выполнением работ осуществляют ученый совет ОНИИ, состоящий из председателя, ученого секретаря и членов совета.

В состав ученого совета входят главные специалисты, представители администрации, партийной и профсоюзной организаций, советов первичной организации НТО. Состав ученого совета ОНИИ утверждается советом первичной организации НТО.

Общественный НИИ, в соответствии с возложенными на него задачами, подразделяется, как правило, на отделы (научные отделения, кафедры и т. д.), которые возглавляют научные руководители — члены ученого совета ОНИИ. Научный руководитель отчитывается на заседании ученого совета о ходе работы не менее 2 раз в год и по окончании года представляет отчет о выполненной работе.

Руководство деятельностью общественной лаборатории или группы осуществляет общественный руководитель. Кандидатуры руководителей ОНИЛ, ОНИГ утверждаются советом первичной организации НТО.

**Вопросы деятельности ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ).** Ученый совет организует работу ОНИИ по ежегодным планам. Проект плана работы общественного НИИ обсуждается на заседании ученого совета ОНИИ и утверждается советом первичной организации НТО. Основой для разработки плана работы ОНИИ служат планы перспективного развития, оргтехмероприятий, научной организации труда, темники по рационализации и изобретательству, планы внедрения новой техники.

2. Пирогов А. И., Шамаев Ю. М. Магнитные сердечники для устройств автоматики и вычислительной техники. М.: Энергия, 1973.

3. Поливанов К. М. Ферромагнетики, М.: Госэнергоиздат, 1957.

4. Конторович М. И. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. — М.: ГЭИТЛ, 1955.

и т. д. По каждой теме плана определяются этапы, сроки выполнения и ответственные исполнители.

Руководитель лаборатории или группы, исходя из производственных задач, при участии активистов разрабатывает план работы своего коллектива. О выполнении плана работы за год руководитель отчитывается перед советом первичной организации НТО.

Условно весь ход проводимых сотрудниками ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) исследований можно разбить на 4 этапа:

- I. Подготовительный период
- II. Экспериментальная часть
- III. Оформление результатов исследования
- IV. Внедрение результатов работы.

На первом этапе работы специалисту необходимо ознакомиться с новейшими достижениями отечественной и зарубежной науки, техники, передового опыта по исследуемому вопросу. Большую помощь исследователям на этом этапе могут оказать общественные бюро технической информации (ОБТИ). Общественные информаторы обеспечивают сотрудникам ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) различными видами научно-технических информационных изданий. ОБТИ целесообразно проводить «Дни информатора» с организацией открытых просмотров научно-технической литературы. Первый этап исследования должен заканчиваться составлением краткого обзора информации по исследуемому вопросу с анализом литературных данных и обобщением опыта других предприятий по данному вопросу.

На втором этапе при разработке подробного плана проведения работы должны быть определены место, сроки проведения исследований, ответственные исполнители, методы испытания и контроля. Этот этап сопровождается технико-экономическим расчетом эффективности проводимого исследования. Для проведения экономического анализа предлагаемого решения, расчета предлагаемого экономического эффекта от выполнения планируемых исследований целесообразно привлекать общественное бюро экономического анализа (ОБЭА).

На третьем этапе ответственному исполнителю необходимо составить отчет о проведенной научно-исследовательской работе, включающей, как правило, следующие основные разделы:

- I. Аннотация
- II. Введение
  - а) состояние вопроса
  - б) цель работы
- III. Экспериментальная часть
  - а) программа и методика исследований
  - б) описание условий и результатов проведения опытов
- IV. Расчет экономической эффективности
- V. Выводы
- VI. Рабочие чертежи
- VII. Рекомендации о внедрении
- VIII. Список использованной литературы

Для выполнения проектно-конструкторских работ (рабочие чертежи) целесообразно по согласованию с советом первичной организации ВОИР привлекать общественные конструкторские бюро (ОКБ).

Отчет ответственного исполнителя рассматривается ученым советом ОНИИ. Заключение ученого совета должно содержать оценку представленной работы, решение о внедрении результатов исследований, планируемые сроки внедрения. Работы, выполненные на уровне изобретения или рационализаторского предложения, должны оформляться в соответствии с установленным порядком.

На четвертом этапе ученому совету ОНИИ необходимо составить «План внедрения» с указанием места и сроков внедрения, ответственных исполнителей и соисполнителей. Для внедрения законченных работ советом первичной организации НТО могут создаваться общественные творческие бригады. Ответственным исполнителем на этапе внедрения является руководитель подразделения, где планируется внедрение. «План» согласуется с соисполнителями, визируется ответственным исполнителем и утверждается главным инженером предприятия или организации, а также председателем совета первичной организации НТО.

Совету первичной организации НТО необходимо уделять постоянное внимание работе ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ).

Совету первичной организации НТО целесообразно:

- направлять сотрудников ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) в творческие командировки на родственные предприятия своей отрасли и других отраслей народного хозяйства, а также предоставлять путевки на ВДНХ и другие выставки для ознакомления с новейшими достижениями науки и техники;
- с целью обучения сотрудников ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) навыкам ведения научных исследований и аналитической обработки результатов, рациональным методам работы с научно-технической литературой организовывать специальные циклы лекций, семинары;

— оказывать помощь ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) в установлении и развитии творческих связей с объединениями, предприятиями, научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими институтами.

За заседаний совета первичной организации НТО следует практиковать отчеты исследований о проводимых экспериментах, обобщать предложения и рекомендации, намечать конкретные меры по их реализации, осуществлять постоянный контроль за внедрением разработок общественных НИИ (лабораторий, групп), направлять деятельность ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) на решение конкретных производственных задач. Целесообразно обсуждать результаты исследований сотрудников ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) на общих собраниях членов НТО.

Совет первичной организации НТО за успешную научно-исследовательскую работу может представлять в дирекцию предприятия, объединения, института предложения о премировании участников ОНИИ (лабораторий, групп). Результаты работ, выполненных сотрудниками ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ), следует учитывать при аттестации инженерно-технических работников, выдвижении их на более высокую должность.

Для морального поощрения участников общественных институтов (лабораторий, групп) совет первичной организации НТО может использовать такие формы поощрения НТО, как объявление благодарностей, награждение грамотами и дипломами, вымпелами, рекомендаций лучших работ для экспозиции на ВДНХ и других выставках.

В целях улучшения пропаганды передового опыта работы общественных НИИ (лабораторий, групп) следует широко использовать средства массовой пропаганды. Для обмена опытом работы ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ) рекомендуется на заседаниях президиумов советов и правлений НТО регулярно заслушивать отчеты председателей ученых советов ОНИИ о проводимой работе; в домах техники НТО организовывать специальные экспозиции и выставки; публиковать статьи в брошюрах по обмену передовым опытом, в программах народных университетов технического прогресса и экономических знаний предусматривать сообщения о лучшем опыте работы ОНИИ (ОНИЛ, ОНИГ); итоги работы ОНИИ обсуждать на научно-технических конференциях и семинарах.



# Перспективы применения новых электротехнических материалов как основы развития электромашиностроения

(Заседание секции № 1 «Теоретические проблемы генерирования электромагнитной энергии» Научного совета АН СССР по комплексной проблеме «Научные основы электрофизики и электроэнергетики», декабрь 1979 г., Ленинград)

В заседаниях секции приняли участие более 100 специалистов 20 организаций из 11 городов страны.

Были заслушаны и обсуждены 25 докладов и сообщений. Во вступительном слове председателя секции академика И. А. Глебова были отмечены успехи в области электротехнических материалов, обеспечившие создание турбогенераторов мощностью 500, 800, 1200 МВт, гидрогенераторов Красноярской и Саяно-Шушенской ГЭС; сформулированы задачи, стоящие перед электромашиностроителями в области создания новых более совершенных генераторов и намечены основные научно-технические проблемы дальнейшего совершенствования электротехнических материалов для решения этих задач. При создании мощных машин перед электромашиностроителями встают сложные и нередко противоречивые проблемы. Так, повышение к. п. д. мощных машин при снижении удельного расхода материалов и обеспечение высокого уровня надежности энергоблоков при работе в стационарных и аномальных режимах возможно только при совершенствовании электротехнических материалов.

Работы в области создания новых электротехнических материалов ведутся в направлении создания: изоляционных и конструкционных материалов; сталей и сплавов с повышенными механическими свойствами; синтетических лаков для лакировки электротехнических сталей; роторных поковок турбогенераторов с улучшенными магнитными свойствами и поковок роторных бандажей с улучшенными механическими свойствами; материалов для перспективных генераторов нового типа. Перспективны работы по созданию сталей, сплавов, скрепляющих составов и компаундов для работы при температуре жидкого гелия.

Требования к изоляционным материалам крупных электрических машин сформулировал в своем выступлении заместитель председателя секций, д. т. н. Я. Б. Данилевич. К перспективным турбогенераторам предъявляются повышенные требования: они должны быть более маневренными, допускать работу в условиях частых пусков, иметь более долгий срок службы и обеспечивать достаточные запасы по эксплуатационной надежности в установившихся и аномальных режимах. В связи с этим требования к изоляции ужесточаются: изоляция должна иметь повышенные механическую прочность и устойчивость к различным воздействиям, допускать повышенный рабочий градиент и иметь срок службы, превышающий срок службы электрической машины в условиях эксплуатации. Повышение надежности изоляции является сложной научно-технической проблемой, решение которой обеспечит в значительной мере надежную работу генераторов.

Перспективы развития и применения металлов и сплавов в крупном электромашиностроении и требования, предъявляемые электромашиностроением к этим материалам, были изложены в докладе к. т. н. Н. А. Грекова.

Рассмотрены материалы: электротехнические стали, проводниковые материалы, материалы для заготовок роторов и роторных бандажных колец, материалы для криогенераторов. Отмечена необходимость создания металлургической базы и оборудования для обеспечения перспективных турбогенераторов заготовками бандажных колец и роторов.

О применении новых материалов в крупных гидрогенераторах говорилось в докладе к. т. н. А. А. Дукшта и др. Новые материалы позволили заметно повысить надежность и долговечность машин, а также решить ряд важных технических проблем, связанных с ростом мощности гидрогенераторов и повышением их технико-экономических показателей. Освоение тонколистовой конструкционной стали с пределом текучести не менее 50 кг/мм для обода ротора способствовало повышению предела окружных скоростей вращения шихтованных роторов до 180 м/с и созданию в конечном итоге крупнейших гидрогенераторов для Саяно-Шушенской ГЭС. Применение немагнитных металлов для нажимных щек полюсов и вентиляционных распорок позволило расширить область допустимых режимов работы. Новые виды термореактивной изоляции и конструкционных материалов обеспечили высокую

эксплуатационную надежность и решили вопросы уплотнения стержней в пазовой и лобовой частях, обеспечили коронозащиту, понизили пожароопасность и др.

О новых электроизоляционных материалах для высоковольтной корпусной изоляции электрических машин и технологических приемов их изготовления были сделаны доклады к. т. н. С. Г. Трубачева, д. т. н. Н. В. Александрова, В. Г. Огонькова и др., а также к. т. н. Ю. Л. Преснова и к. т. н. И. Т. Сушкиной.

Разработан и внедряется в производство ряд новых электроизоляционных материалов и технологических приемов изготовления изоляции, обеспечивающих повышение характеристик изоляции с одновременным сокращением технологического времени изготовления изоляции. Разработана целая гамма электроизоляционных материалов, обеспечивающих надежное крепление обмоток: препреги, отверждающиеся как при комнатной, так и при повышенной температуре; формующиеся материалы; стеклонаполненные лавсановые шнуры и т. д.

Проблемам создания изоляционных лаковых покрытий на синтетической основе для электротехнической стали был посвящен доклад к. т. н. Ю. Л. Преснова и др., а также д. т. н. Л. Т. Пономарева и др. Получен электроизоляционный лак на основе синтетического каучука с малым содержанием натуральных масел вместо используемого в настоящее время лака марки КФ-965, содержащего тунговое и льняное масла. Применение нового лака ЛЭ-7 вместо лака КФ-965 повысит качество лаковых покрытий электротехнической стали, сократит число лакировок и значительно снизит применение дефицитных растительных масел.

Применению новых конструкционных материалов был посвящен доклад к. т. н. Ю. Л. Преснова, М. З. Циркина и др. Применение новых листовых электротехнических стеклотекстолитов: стеклотекстолита СТЭТФ для длительной эксплуатации при рабочих температурах до 180°C, стеклотекстолита СТЭБ с пониженной горючестью и стеклотекстолита СТЭХД повышенной водостойкости позволило улучшить ряд параметров и эксплуатационную надежность мощных электрических машин. Даны рекомендации по применению новых материалов для крепления лобовых частей статорной обмотки.

Ряд докладов был посвящен разработке новых материалов для генераторов с использованием явления сверхпроводимости при охлаждении жидким гелием. В докладах акад. И. А. Глебова, д. т. н. Я. Б. Данилевича, д. т. н. Л. Т. Пономарева и др. была рассмотрена проблема создания скрепляющих материалов для криогенного электрооборудования. В докладе сформулированы технические требования к скрепляющим материалам для криогенного электрооборудования, приведены результаты экспериментальной проверки составов на удовлетворение сформулированным техническим требованиям. Экспериментальная проверка показала, что создание материалов для криогенного электрооборудования — очень сложная проблема, для решения которой необходимо проведение фундаментальных исследований. Необходима разработка теоретических аспектов термофлуктуационной теории прочности полимеров, фононного механизма теплофизических свойств полимеров в диапазоне криогенных температур и критерия устойчивости к циклам нагрева и охлаждения.

Приведены результаты теоретического рассмотрения путей создания полимеров, удовлетворяющих сформулированным требованиям, и результаты исследования свойств созданных скрепляющих материалов с использованием новых синтетических олигомеров (к. х. н. К. Ю. Салинис, к. х. н. Г. Н. Петров и др.). Результаты работы по синтезу новых синтетических олигомеров, удовлетворяющих предъявленным требованиям, для скрепляющих материалов, устойчивых при криогенных температурах, были доложены авторами на заседании секции.

Ряд докладов был посвящен дальнейшему совершенствованию систем изоляции.

В докладе акад. И. А. Глебова, д. т. н. Я. Б. Данилевича, д. т. н. Л. Т. Пономарева были рассмотрены перспективы создания новой системы изоляции Эластонит с улучшенными электрическими характеристиками, позволяющими использовать ее для изоляции высоконапряженных мощных машин. Исследования системы изоляции эластонит на макетах показали ее перспективность. Средний срок службы изоляции Эластонит при напряженности электрического поля  $E=10$  кВ/мм составляет более 5000 ч благодаря высокой короностойкости материала, что дает возможность уже сегодня применять ее при линейном рабочем градиенте 5 кВ/мм. При совершенствовании технологии можно достигнуть более высоких рабочих градиентов порядка 10 кВ/мм.

Исследования термореактивной изоляции монолит (доклад к. т. н. Г. А. Алексеева и др.) показали, что в целях повышения диэлектрических свойств изоляции статорных обмоток, изготавляемой методом вакуум-нагнетательной пропитки, необходимо производить перед пропиткой подпрессовку изоляции, что позволяет одновременно и утоньшить изоляцию. Необходима разработка пропиточного компаунда, обладающего в течение заданного промежутка времени низкой вязкостью и малым нарастанием вязкости со временем.

Разработана и внедрена в производство промышленная технология изготовления катушечных и стержневых многовитковых обмоток с термореактивной изоляцией (докладчик В. А. Зиннер). При обеспечении такой технологии обмотки отличаются высокой надежностью и ремонтоспособностью.

На заседаниях секции были представлены достижения в области создания новых материалов для инерционных накопителей энергии в электромашинных агрегатах кратковременного действия (акад. И. А. Глебов, д. т. н. Э. Г. Каширский, Н. Г. Кустов, к. т. н. Ф. Г. Рутберг, д. т. н. Г. М. Хуторецкий); новых материалов — сплавов для постоянных магнитов из редкоземельных металлов с кобальтом; материалов для двухслойных массивных роторов машин переменного тока (д. т. н. Э. Г. Каширский, д. т. н. В. С. Могильников); применения полупроводящих конструктивных материалов для высоковольтных обмоток беспазовых статоров мощных турбогенераторов (к. т. н. Р. Е. Маламуд); в области создания электроизоляционных покрытий (к. т. н. В. Л. Тризно и др.; к. т. н. П. М. Пилипюсия и др.); изоляционных материалов для специальных условий эксплуатации (д. т. н. А. К. Ванденбург, к. т. н. А. И. Голушко и др.).

Доклады и дискуссии по ним показали актуальность рассматриваемой проблемы, возросшие требования к электротехническим материалам, необходимость ускорения разработки новых электротехнических материалов с повышенными техническими и качественными характеристиками, обеспечивающими повышенные требования по эксплуатационной надежности генераторов в стационарных и аномальных режимах. Д. т. н. И. Д. Урусов в выступлении отметил необходимость решения проблемы определения уровня и статистического рас-

пределения механических воздействий на вал турбоагрегатов и его прочностных характеристик при различных аномальных режимах в системе.

Представитель Минэнерго СССР П. С. Кабанов указал на необходимость ускорения исследовательских работ по созданию изоляционных материалов, стойких к огнестойкому маслу ОМТИ для использования в турбогенераторах; на необходимость разработки изоляции для ремонта обмоток статоров генераторов, снятых с производства; необходимость изготовления на электромашиностроительных заводах сегментов подплатников с фторопластовыми покрытиями.

В решении заседания секции отмечены успехи в создании электротехнических материалов; определены направления дальнейшего исследования и создания новых электротехнических материалов:

создание новых электротехнических материалов для применения в конструкции мощных энергоагрегатов;

создание аппаратуры для многоточечных автоматизированных измерений диэлектрических характеристик, электромагнитных параметров, механических напряжений и температуры;

разработку новых макетных установок для моделирования воздействия в конструкции с приближением к реальным условиям работы генераторов;

разработку кинетической теории прочности твердых тел, термофлуктуационной теории прочности полимеров, фононной теории теплопроводности, критерия устойчивости материалов к циклам нагрева и охлаждения.

Заседание сочло необходимым:

рекомендовать ВНИИЭИМ расширить исследовательские работы по созданию изоляции для ремонтных работ статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов, снятых с производства;

организовать изготовление сегментов подплатников с фторопластовыми покрытиями на электромашиностроительных заводах;

просить ЛПЭО «Электросила» ускорить исследовательские и экспериментальные работы по изготовлению бандажных колец из титана.

Заседание секции № 1 Научного Совета АН СССР позволило оценить уровень выполненных научных исследований, наметить основные научно-технические проблемы дальнейшего совершенствования электротехнических материалов, привлечь внимание специализированных предприятий и учреждений АН СССР к решению задач, связанных с исследованием и созданием новых электротехнических материалов, необходимых для создания высоконапряженных генераторов с повышенной степенью эксплуатационной надежности, а также промышленных криогеногенераторов. Была отмечена целесообразность периодического проведения заседаний по этим вопросам.

Канд. техн. наук ШМОНИНА Л. И.

УДК 621.315.61:061.3

## Семинар по вопросам старения изоляции крупных электрических машин

(г. Сочи, декабрь 1979 г.)

Учитывая важность обсуждаемой проблемы для промышленности и эксплуатационных организаций, Минэнерго СССР еще в 1977 г. организовало и провело первое совещание по этим вопросам на одной из электростанций Молдавской ССР, о результатах которого сообщалось в «Электричестве». Совещание имело целью обмен опытом по широкому использованию математических методов при исследованиях изоляции электрических машин. Эта цель была достигнута, так как совещание 1977 г. послужило мощным толчком к интенсификации исследований.

Изоляция обмоток является одним из важнейших элементов электрической машины. Физические процессы, происходящие в этой сложной композиционной конструкции, до на-

стоящего времени изучены далеко не в полной мере. Поэтому во всем мире идет научный поиск в этом направлении, главной целью которого является получение зависимостей, описывающих изменение состояния изоляции во времени, т. е. закономерностей ее старения, без которых нельзя оценить долговечность статорной обмотки.

Значительный объем исследования ведется на основе функциональных испытаний систем изоляции на макетах, образцах, натурных стержнях и частях обмотки в лабораторных условиях. При этом стремятся к отработке методик многофакторных испытаний, так как они наиболее полно отражают условия, близкие к реальным, эксплуатационным.

Не менее важную часть составляют исследования на основе обработки эксплуатационных показателей реально работающих электрических машин (статистическое исследование результатов естественного эксперимента). Известно, что такие работы ведутся в Советском Союзе, Швейцарии и ряде других стран, однако основные положения данного направления исследований опубликованы только в СССР — в журнале «Электричество».

Для формулы закономерности старения желательно получение аналитического описания физических процессов, происходящих в композиционных диэлектриках. В этом плане чрезвычайно важны теоретические исследования (исходящие, например, из предположений, развиваемых школой Журкова), но, очевидно, что только совпадение результатов всех направлений исследований в описании закона старения изоляции позволит его признать и использовать в практических целях. Практическим использованием закона старения, в частности, является оценка физических процессов, происходящих в конкретной работающей изоляции (что имеет существенное значение для дальнейшего совершенствования систем изоляции), оценка различных реальных ситуаций в процессе ее изготовления и эксплуатации (что может служить средством воздействия на уровень надежности работы оборудования и возможностей его повышения). Некоторые методы диагностики состояния изоляции, организация профилактического и ремонтного обслуживания также должны опираться на закономерность старения.

В последние годы уделяется весьма серьезное внимание вопросам изучения важного и, что немаловажно, дорогостоящего элемента электрической машины — статорной изоляции обмоток. В Минэлектротехпроме и Минвиде СССР предпринимаются широкие меры для создания новых и укрепления существующих экспериментальных баз, существенно возросла роль головного института отрасли.

Рассмотренные на семинаре доклады показали, что исследования в области изоляционных конструкций имеют существенный прогресс, а авторы ряда работ близки к получению закономерностей старения изоляции;

работы в области профилактических испытаний и методов диагностической оценки состояния изоляции ведутся широким фронтом, в их числе имеются существенные достижения, однако в целом они требуют совершенствования как в области анализа, так и в части их дальнейшего развития;

существует полезное и плодотворное сотрудничество научно-исследовательских институтов, электростанций и ремонтных организаций, направленное на решение вопросов ремонта и восстановления обмоток. Заслуживают внимания вопросы создания систем термореактивной изоляции, предназначенных для использования ремонтными организациями при переводах генераторов с микалентной на термореактивную изоляцию.

Вопросам теоретических исследований посвящены работы Томского политехнического института (В. С. Дмитревский), Ленинградского политехнического института и НИИ ЛПЭО «Электросила» (С. Н. Койков, А. А. Житомирский, О. П. Пищулина). Оценка одновременного воздействия нескольких факторов на изоляцию (температуры, переменного электрического поля, механических воздействий) посвящены работы ВНИИЭИМ (Б. А. Городенский, Т. О. Деревнина, А. В. Хавловский); воздействия температуры и электрического поля — Харьковского политехнического института (Л. А. Щебенюк, Б. Т. Минаев); оценке основных условий адекватного воспроизведения термоциклических напряжений — НИИ ЛПЭО «Электросила» (Б. Д. Ваксер, А. А. Житомирский, Р. С. Поляков, Ю. Л. Преснов); связь термомеханических напряжений и долговечности изоляции — НИИ завода «Электротяжмаш» (В. Б. Бунер, А. Д. Дунаевский); совместному воздействию электрического поля и циклической деформации — ВНИИЭ (Ю. Н. Самородов, С. И. Ломакин); оценке влияния на долговечность изоляции статического сжатия и изгиба — НИИ ЛПЭО «Электросила» (Т. Ю. Баженова и др.); определению класса нагревостойкости новых типов изоляции — завода им. Владимира Ильича (Л. М. Бернштейн, А. С. Куренков, Н. С. Окинин); оценке воздействия дуговых разрядов — Донецкого политехнического института (М. П. Дергилев и др.). С большим интересом были выслушаны доклады, посвящен-

ные анализу рабочего состояния изоляции работающих электрических машин, особенно гидрогенераторов, на основе использования типовых кривых вероятности аварийного пробоя (И. Б. Байкова, Л. А. Белова, П. С. Кабанов, Л. Г. Мамиконянц, Н. А. Мельниченко, В. Ф. Пушкарев, В. Н. Тутубалин и др.); анализу опыта длительного использования профилактических испытаний (Л. А. Белова, Л. Г. Мамиконянц, В. Н. Тутубалин; В. Н. Осотов, Ж. Г. Меклер, Б. И. Козырев и др.).

Следует также отметить ряд интересных докладов и сообщений, относящихся к диагностике и изучению влияния частичных разрядов, использованию акустической эмиссии и т. п. (СибНИИЭ, ВНИИЭ, МИФИ и др.), оперативному контролю за состоянием изоляции с помощью микро-ЭВМ (Белорусский политехнический институт). Особый интерес представляет обзорный доклад по методам диагностики, подготовленный ВНИИЭ (Б. А. Алексеев). Опыт эксплуатации различных изоляционных конструкций был освещен в сообщениях В. Н. Ермолова, В. Б. Кулаковского, Ю. Н. Самородова, Г. И. Лысаковского, В. Л. Таловерья и др.

Вопросы ремонта являются в настоящее время очень острыми, так как в эксплуатации находится значительное число вполне работоспособных генераторов, требующих лишь некоторой модернизации, в том числе статорной изоляции. Эти вопросы были затронуты в докладах НИИ завода «Сибэлектротяжмаш», Свердловскэнерго, ВНИИЭИМ, Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС, ЛПИ им. М. И. Калинина и др. Очевидно, по мере накопления опыта этот вопрос должен быть обсужден на следующем семинаре.

В результате обсужденияложенных материалов участники семинара единодушно пришли к выводам о необходимости дальнейшего широкого использования аппарата математической статистики и теории вероятностей для анализа работы электрической изоляции всех машин; более углубленного изучения физических процессов старения изоляции с учетом воздействия на ее качество ряда факторов как при эксплуатации и ремонтах, так и в ее производстве; расширения изучения физических свойств изоляции путем статистического исследования эксплуатационных данных за счет начала работ по многофакторному анализу влияния всех имеющихся в эксплуатации воздействий (электрическое поле, тепловое и механическое воздействия, перенапряжения и др.); продолжения и расширения в лабораториях учебных и отраслевых институтов, в ведущих объединениях и на заводах электротехнической промышленности исследований в области функциональных испытаний систем изоляции при одновременном воздействии основных старящих факторов.

В целях координации работ по вопросам старения изоляции рекомендовано ведущим организациям Минэлектротехпрома, Минэнерго СССР и ведомств подготовить предложения для включения важнейших из них в народнохозяйственный план. Совещание обратилось к Госкомитету СССР по науке и технике, Минэлектротехпрому и Минэнерго СССР с просьбой рассмотреть и решить вопрос о включении в план важнейших работ задание по исследованию долговечности (срок службы) высоковольтной композиционной изоляции и разработке эффективных методов анализа и диагностики как в процессе разработки изоляции, так и при ее эксплуатации. Кроме того, ряд рекомендаций, принятых совещанием, относится к организационно-техническим мероприятиям, направленным на отработку схем и методов измерений, создания унифицированной аппаратуры и разработку систем контроля и качества изоляции.

В заключение следует отметить, что совещание высоко оценило и единодушно одобрило комплексное направление работ ВНИИЭ под руководством к. т. н. Беловой Л. А. по статистическому исследованию характеристик изоляции на основе обработки эксплуатационных данных и статистическому анализу повреждаемости изоляции турбо- и гидрогенераторов в соответствии с разработанной методикой сравнительной оценки качества изоляции.

Ворошиловградская ГРЭС, ПЭО Донбассэнерго и Минэнерго УССР хорошо организовали проведение семинара в г. Счастье, за что заслуживают благодарности от всех его участников.

НИКИТИН П. З.

## СОДЕРЖАНИЕ

Непорожний П. С.—Пропагандист и проводник в жизнь ленинских идей электрификации страны . . . . .	6
Никитин Ю. А.—Летопись отечественной электротехники . . . . .	8
Бертинов А. И., Евсеев Б. Н.—Журнал «Электричество» в период реализации плана ГОЭЛРО и строительства социализма в СССР (1922—1941 гг.) . . . . .	9
Будзко И. А.—Журнал «Электричество» во время Великой Отечественной войны и первых послевоенных пятилеток (1944—1955 гг.) . . . . .	15
Веников В. А.—Прогресс электротехники и электроэнергетики и журнал «Электричество» (1956—1979 гг.) . . . . .	22
Меерович Э. А., Назаров Л. А., Карабаев Г. Х., Кокуркин Б. П.—Измерение токов линий высшего напряжения по их магнитным полям . . . . .	32
Тозони О. В.—Принципы электродинамической теории цепей . . . . .	40
Арзамасцев Д. А., Летун В. М.—Определение экономичного режима гидро-тепловой энергосистемы . . . . .	47
Попов И. Н., Соколова Г. В.—Селективная направленная защита гидрогенераторов от замыканий на землю . . . . .	51
СООБЩЕНИЯ	
Лукашов Э. С.—О движении центра инерции электрической системы . . . . .	59
Шакарян Ю. Г., Цгоец Р. С., Суханов Л. А., Сафиуллина Р. Х.—О режимах работы мощных асинхронизированных синхронных машин в электрической системе . . . . .	61
Федоров А. А., Корнилов Г. П.—О применении компенсирующих устройств в системах электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками . . . . .	64
Яблоньски В., Шатковска-Карпа Б.—Допустимые напряжения прикосновения в проекте стандарта СЭВ . . . . .	67
Афанасьев Ю. В.—О проницаемости тел, находящихся в намагничиваемых средах . . . . .	70
Пеккер Д. И.—О влиянии вихревых токов на переходные процессы в устройствах с кольцевыми сердечниками из ферромагнитной ленты . . . . .	72
ХРОНИКА . . . . .	
74	

## CONTENTS

The Propagandist and Champion for Carrying Out Lenin's Ideas on Electrification of the Country—P. S. Neporodny . . . . .	6
The Chronicle for Electrical Engineering in Our Country—U. A. Nikitin . . . . .	6
The Journal «Electruchestvo» When the Plan GOELRO Was Being Carried Out and Socialism Built in the USSR (1922—1941)—A. I. Bertinov, B. N. Yevseyev . . . . .	9
The Journal «Electruchestvo» During the Great Patriotic War and the First Post—War Five—Year Periods (1944—1955)—I. A. Budzko . . . . .	15
Progress in Electrical Engineering and the Power Industry, and the Journal «Electruchestvo» (1956—1979)—V. A. Venikov . . . . .	22
Measuring Currents in HV Lines Using Their Magnetic Fields—E. A. Meyerovitch, L. A. Nazarov, G. H. Karabayev, B. P. Kokurkin . . . . .	32
Fundamentals of Electrodynamical Circuit Theory—O. V. Tozoni . . . . .	40
Determining Economical Operating Conditions of a Hydro—Thermal Power System—D. A. Arzamastsev, V. M. Letun . . . . .	47
REPORTS	
How the Center of Inertia of a Power System Travels—E. S. Lukashov . . . . .	59
On the Operating Conditions for Large Doubly—Fed Synchronous Machines in a Power System—U. G. Shakarian, R. S. Tsgoyer, L. A. Suckhanov, R. H. Safiullina . . . . .	61
Application of Compensating Devices in Power Supply Systems Having Large Non—Linear Loads—A. A. Fedorov, G. P. Kornilov . . . . .	64
Allowable Contact Voltages in the Draft of the CMEA Standard—V. Jablonski, B. Shatkovska-Karpa . . . . .	67
The Permeability of Objects in Magnetized Media—U. V. Afanasiev . . . . .	70
The Influence of Eddy Currents on Transients in Devices With Ring Shaped Cores Made From Ferromagnetic Tape—D. I. Pekker . . . . .	72
CHRONICLE . . . . .	
74	

# РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 621.315.1:621.317.312

Измерение токов линий высшего напряжения по их магнитным полям. Меерович Э. А., Назаров П. А., Карабаев Г. Х., Кокуркин Б. П. — «Электричество», 1980, № 7. Дано описание способа измерения токов ВЛ СВН по их магнитным полям. Предложена методика размещения магниточувствительных элементов под проводами ВЛ в построения решают схем, позволяющих выделить сигналы, пропорциональные мгновенным значениям фазных токов и их любых линейных комбинаций с использованием минимального количества магниточувствительных элементов. Приведены результаты измерений токов ВЛ 750 кВ в установившемся и переходном режимах. Библ. 18.

УДК 621.372.22.001

Принципы электродинамической теории цепей. Тозони О. В. — «Электричество», 1980, № 7.

Изложены основы теории электрических цепей, которая, оперируя только с токами и потенциалами, отражает весь электромагнитный процесс в системе, учитывая электромагнитные взаимодействия между ее элементами и влияние окружающей среды. Введены понятия коммуникатора, контурных потенциалов и локальных компонентов. Приведены интеграло-дифференциальные уравнения цепи и предложено их решение путем трансформации в интегральные уравнения второго рода. Библ. 18.

УДК 621.311.16.001.24.

Определение экономического режима гидро-тепловой энергосистемы. Арзамасцев Д. А., Летун В. М. — «Электричество», 1980, № 7.

Описан метод оптимального распределения активной мощности между станциями гидро-тепловой энергосистемы. В отличие от ранее предложенных методов новый подход обеспечивает наиболее эффективный учет интегральных ограничений, не прибегая к использованию множителей Лагранжа. Приведены теоретические обоснования использования метода для определения экономичного режима гидро-тепловой энергосистемы. Библ. 3.

УДК 621.316.925.

Селективная направленная защита гидрогенераторов от замыканий на землю. Попов И. Н., Соколова Г. В. — «Электричество», 1980, № 7.

Определены требования к защите на основе рассмотрения характера повреждений корпусной изоляции статорных обмоток гидрогенераторов и сопровождающих повреждения волновых переходных процессов; рассмотрен выбор основных параметров защиты, описана схема защиты, приведены результаты ее испытаний и эксплуатации. Библ. 14.

УДК 621.311.018.782.3.001.24

О движении центра инерции электрической системы. Лукашов Э. С. — «Электричество», 1980, № 7.

Приведено уравнение движения центра инерции электрической системы в позиционной идеализации при наличии в схеме активных проводимостей. Показано, что в этом случае движение центра инерции системы зависит от взаимных колебаний генераторов. Библ. 3.

УДК 621.313.32.001.24

О режимах работы мощных асинхронизированных синхронных машин в электрической системе. Шакарян Ю. Г., Цгоеев Р. С., Суханов Л. А., Сафиуллина Р. Х. — «Электричество», 1980, № 7.

Дан анализ предельных режимов асинхронизированной синхронной машины. Показано, что имеется принципиальная возможность кратковременного увеличения предельного скольжения машины. Библ. 6.

УДК 621.311.44:621.3.016.25.077.8

О применении компенсирующих устройств в системах электропитания с мощными нелинейными нагрузками. Федоров А. А., Корнилов Г. П. — «Электричество», 1980, № 7.

Приведены результаты исследований и рекомендации по использованию компенсирующих устройств мощных вентильных преобразователей постоянного тока, работающих с постоянной и ударной нагрузками. Для снижения потерь электрической энергии и улучшения ее качества предложено включение конденсаторов к вентильным обмоткам преобразовательных трансформаторов. Исследуется их влияние на загрузку трансформатора и на качество напряжения питающей сети. Даны практические рекомендации по выбору и расчету замкнутой системы автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности в узле с ударной вентильной нагрузкой. Библ. 8.

УДК 621.316.933.8(083.75)

Допустимые напряжения прикосновения в проекте стандарта СЭВ Яблоньский В., Шатковская-Карпа Б. — «Электричество», 1980, № 7.

Дано обоснование предложенных в проекте стандарта СЭВ значений наибольших допускаемых напряжений прикосновения в электроэнергетических установках переменного тока напряжением выше 1 кВ. Предложения сделаны с учетом значений поражающих токов, признанных опасными для человека, зависимости сопротивления тела человека от напряжения прикосновения, а также влияния вероятности поражения человека электрическим током на объем дополнительных мер защиты. Библ. 27.

УДК 621.318.34:538.6

О проницаемости тел, находящихся в намагничиваемых средах. Афанасьев Ю. В. — «Электричество», 1980, № 7.

Приведена формула для расчета магнитной проницаемости тел, находящихся в намагничиваемых средах. Рассмотрены следствия, вытекающие из этой формулы для случаев, когда магнитная проницаемость окружающей среды меньше и больше магнитной пропицаемости вещества, заполняющего тело. Библ. 5.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бертинов А. И., Будзко И. А., Веников В. А., Глебов И. А., Евсеев Б. Н. (зам. главного редактора), Ефремов И. С., Иванов-Смоленский А. В., Ильинский И. Ф., Комельков В. С., Костенко М. В., Лабунцов В. А., Ларинов В. П., Лидоренко Н. С., Лизунов С. Д., Мамиконянц Л. Г. (главный редактор), Меерович Э. А., Мучник Г. Ф., Нетушил А. В., Рабинович С. И., Сабинин Ю. А., Слежановский О. В., Соловьев С. А., Тареев Б. М., Тихоедев Н. Н., Толстов Ю. Г., Федосеев А. М., Шакарян Ю. Г., Шаталов А. С., Шилин Н. В.

Научные редакторы: А. Б. Желдыбин, Б. Д. Макаршин

Адреса редакции: 103012, Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 294-24-80.

101000, Москва, Главный почтамт, абонентский ящик № 648

Адрес для телеграмм: МОСКВА 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Технический редактор Н. Н. Хотулева

Сдано в набор 15.05.80  
Усл. печ. л. 10,0

Подписано в печать 03.07.80  
Уч. изд. л. 11,84

Т-13050

Формат 60×90<sup>1/8</sup>

Печать высокая  
Заказ 632  
Тираж 7739

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10  
Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10