

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



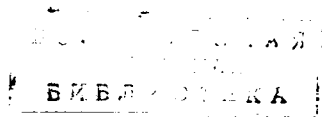
# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

10  
1952  
ОКТАБРЬ

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>К новому мощному подъему электрификации Советского Союза</i>	3
Н. П. Иванов и Г. Н. Петров — Гидрогенераторы	11
В. Ю. Гессен, В. В. Ивашев, В. Г. Кожемякин и Л. Д. Наумовский — Трансформатор для емкостного отбора мощности от высоковольтных линий электропередачи	25
М. М. Акодис — Регулирование скорости нарастания обратного напряжения в цепях с ионными вентилями	31
Р. И. Караев — Методика расчетов симметричных режимов работы дуговых печей	38
И. К. Федченко и М. Е. Иерусалимов — Новый метод профилактических испытаний аппаратов изоляторов	45
Н. М. Горбатов — Расчет токов короткого замыкания в трехфазных цепях с последовательной несимметрией	49
Г. С. Векслер — Метод получения основной кривой намагничивания	53
И. Н. Кротков — Классификация мостовых схем постоянного и переменного токов	60
В. Н. Мильштейн — Частотная компенсация вольтметров переменного тока	67
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
Б. Н. Ржонский — Дмитрий Александрович Лачинов. К 50-летию со дня смерти	75
Л. Д. Белькинд — Первая всесоюзная светотехническая выставка 1927 г.	79
<b>ДИСКУССИИ</b>	
К статье Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского „О схемах городских электрических сетей в связи с многоэтажным строительством“ — Б. Л. Айзенберг, Н. В. Волоцкий	81
<b>ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ</b>	
Успехи советской радиотехники. Опоры уличных светильников. Высоковольтные индукционные выпрямители. Сердечники из холоднокатанной стали для силовых трансформаторов. Координация места установки разрядников с уровнем импульсной прочности трансформаторов. Люминесцентные лампы с холодными катодами	83
<b>ХРОНИКА</b>	
На строительстве крупнейших волжских гЭС пятой пятилетки. На расширенном пленуме правления МОНИТОЭ, посвященном открытию Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина. Награждение строителей Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина. Совещание южных отделений ВНИТОЭ	91
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
Электроснабжение промышленных предприятий. — От редакции	93
Э. М. Каждан, З. Н. Щегольков, С. П. Розанов и Л. Б. Гейлер — Книга А. А. Федорова и Б. А. Князевского „Электроснабжение промышленных предприятий“ и книга Ю. Л. Мухомеева „Вопросы электроснабжения промышленных предприятий“	93



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К-4-24-80

Адрес для телеграмм: Москва Электричество.

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт,  
почтовый ящик № 648.

**„Выполнение пятого пятилетнего плана явится крупным шагом вперед по пути развития от социализма к коммунизму“.**

(Из проекта ЦК ВКП(б) директив XIX съезда партии по пятому пятилетнему плану развития СССР на 1951—1955 гг.)

## **К новому мощному подъему электрификации Советского Союза**

XIX съезд Всесоюзной Коммунистической партии (большевиков) является крупнейшим историческим событием в жизни партии всего советского народа.

Съезд подведет итоги огромной созидательной работы по укреплению могущества Советской страны и подъему благосостояния трудящихся в условиях все большего сплочения советского народа вокруг славной коммунистической партии и гениального и любимого вождя товарища Сталина.

На съезде будет намечена новая величественная программа — будут приняты директивы по осуществлению пятого пятилетнего плана, обеспечивающего дальнейший подъем всех отраслей народного хозяйства, рост материального благосостояния, здравоохранения и культурного уровня народа.

Созыв очередного партийного съезда советского народ встречает новыми трудовыми подвидами, демонстрирующими перед всем миром неуклонное стремление к созидательной работе во имя великой цели — построения в нашей стране коммунистического общества.

Вместе с советским народом XIX съезд партия радостно встречает и все трудящиеся страны народной демократии: Польши, Чехословакии, Румынии, Болгарии и Албании, Монгольской Народной Республики, Народной Республики Китая и Германской Демократической Республики, составляющие могучую армию, усердно борющуюся за мир во всем мире и с энтузиазмом идущую по революционному пути строительства социализма в своих странах. Огромные достижения Советского Союза в политической, хозяйственной и культурной областях социалистического строительства ныне полностью используются в государственном развитии стран народной демократии.

Дружные устремления всей внешней и внутренней политики нашего государства завоевали искренние симпатии и сочувствие со стороны трудящихся всех стран мира. К трибуне партийного съезда будут обращены также взоры всех угне-

тенных и эксплуатируемых народов капиталистических стран, где в результате неудержимой гонки вооружений и выжимания капиталистами максимальных прибылей все больше растет обнищание широких масс трудящихся.

В нашей стране в результате победы социализма ликвидированы эксплуататорские классы, не существует эксплуатации человека человеком. Советское общество состоит из дружественных классов. Упрочилось морально-политическое единство советского народа.

Теперь главные задачи состоят в том, чтобы построить коммунистическое общество путем постепенного перехода от социализма к коммунизму, непрерывно повышать материальный и культурный уровень общества, воспитывать членов общества в духе интернационализма и установления братских связей с трудящимися всех стран, всемерно укреплять активную оборону Советской Родины от агрессивных действий ее врагов.

Немногие дни отделяют нас сегодня от славного тридцатипятилетия Великой Октябрьской социалистической революции. В 1917 г. большевистская партия, возглавляемая великим Лениным и его ближайшим и верным соратником товарищем Сталиным, организовав союз рабочего класса и трудового крестьянства, добилась свержения в России власти капиталистов и помещиков и установления советской власти.

Под испытанным руководством коммунистической партии советский народ успешно выполнил сталинские пятилетние планы, в итоге которых экономика, культура и государственная мощь нашей страны небывало возросли.

В своей исторической речи на собрании избирателей 9 февраля 1946 г. товарищ Сталин наметил величественную программу дальнейшего развития народного хозяйства СССР, определившую высокие темпы электрификации нашей страны. В 1950 г. были приняты постановления правительства о строительстве грандиозных гидроэлектростанций и каналов на Волге, Днепре, Дону, Аму-Дарье. Идет строительство также ряда других крупных гидроэлектростанций.

Пятый пятилетний план, как отмечается в проекте ЦК ВКП(б) директив XIX съезда, вновь демонстрирует перед всем миром великую жизненную силу социализма, коренные преимущества социалистической системы хозяйства перед капиталистической системой. Этот пятилетний план является планом мирного хозяйственного и культурного строительства. Он будет содействовать дальнейшему упрочению и расширению экономического сотрудничества Советского Союза и стран народной демократии и развитию экономических сношений со всеми странами, желающими развивать торговлю на началах равноправия и взаимной выгоды.

Проект директив съезда по новому пятилетнему плану намечает дальнейший технический прогресс во всех отраслях народного хозяйства СССР. Повышение уровня промышленного производства в целом намечается за пятилетие на 70%. При этом рост производства отдельных видов промышленной продукции в 1955 г. по сравнению с 1950 г. намечается примерно в следующих размерах: чугуна на 76%, стали на 62%, угля на 43%, нефти на 85%, электроэнергии на 80%, паровых турбин в 2,3 раза, гидротурбин в 7,8 раза, паровых котлов в 2,7 раза, автомобилей на 20%, тракторов на 19% и т. д.

Наряду с вводом в действие новых предприятий и агрегатов должна быть увеличена мощность действующих предприятий за счет их реконструкции, установки нового оборудования, механизации и интенсификации производства и улучшения технологических процессов.

Использование расширения существующих предприятий рассматривается как важнейший резерв увеличения производства при наименьших затратах. Одновременно ставится задача о создании заделов в строительстве промышленных предприятий, в том числе в строительстве электрических станций, чтобы обеспечить необходимое развитие важнейших отраслей промышленности в последующие годы.

В области электрификации предусмотрены высокие темпы наращивания мощностей электростанций. Для того, чтобы полностью удовлетворить растущие потребности народного хозяйства и бытовые нужды населения в электроэнергии и увеличить резерв в энергетических системах.

Машиностроение, являющееся основой нового мощного технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства СССР, будет развиваться согласно проекту директив съезда высокими темпами. Продукция машиностроения и ме-

таллообработки за пятилетие должна быть примерно в 2 раза.

Для удовлетворения растущих потребностей народного хозяйства предусматривается значительный рост химической и лесной промышленности и промышленности строительных материалов. Большую роль в развитии лесной промышленности должно сыграть дальнейшее расширение электрификации лесозаготовок.

Высокими темпами будет расти производство предметов массового потребления; объем продукции легкой и пищевой промышленности ожидается увеличить не менее чем на 70%.

Вместе с количественным ростом производства проектируемым в новом пятилетии, серьезное внимание обращается на дальнейшее повышение качества изделий, в частности, путем решительного внедрения государственных стандартов, отвечающих современным требованиям.

Значение электрификации сельского хозяйства становится особенно заметным в пятом пятилетнем плане. Главная задача в области сельского хозяйства — повышение урожайности сельскохозяйственных культур, дальнейшее увеличение общественного поголовья скота при одновременном значительном росте его продуктивности, увеличение валовой и товарной продукции земледелия и животноводства — должна быть решена путем дальнейшего укрепления и расширения общественного хозяйства колхозов, улучшения работы совхозов и МТС на основе внедрения передовой техники и агрокультуры. В этом отношении одним из важнейших средств является электрификация сельскохозяйственного производства, внедрение электричества в целый ряд технологических процессов сельскохозяйственного производства и в быт колхозников.

Широкое применение электротракторов, сельскохозяйственных машин, работающих на базе использования электроэнергии, особенно в районах крупных гидроэлектростанций, должно дать значительный экономический эффект.

Валовый урожай зерна намечено увеличить за пятилетие на 40...50%, хлопка на 55...65%, сахарной свеклы на 65...70% и т. д. Предусмотрен значительный рост продукции животноводства. Проект директив съезда намечает осуществление в широких масштабах таких важных мероприятий в сельском хозяйстве, как: полесозащитные лесосаждения, орошение, обводнение, осушение болот и т. п. Ставится задача завершить механизацию основных полевых работ и широко развить механизацию трудоемких работ в животноводстве и в других отраслях сельского хозяйства.

Большое значение для дела электрификации сельского хозяйства имеет указание, содержащееся в проекте директивы съезда о направлении капиталовложений колхозов в первую очередь развитие общественного хозяйства. Строительство колхозных электростанций отнесено проектом директив к работам, на которые капиталовложения колхозов должны быть направлены в первую очередь. Колхозные электростанции играют важную роль в успешном развитии общественного хозяйства колхозов и увеличении доходов колхозов и колхозников.

На основе роста промышленности и сельского хозяйства в новом пятилетии увеличится товарооборот и грузооборот. Это потребует нового увеличения в данных областях электрических механизмов, машин, аппаратов и устройств. Многими видами электрических холодильников, электрических кассовых и счетных аппаратов, электрических фасовочных машин, подъемно-транспортных устройств и т. п. оборудованием необходимо оснастить сеть торгово-складских предприятий и перевалочных баз в стране. Дальнейшее развитие с широким использованием электрической энергии получит железнодорожный, водный и воздушный транспорт. Телеграфно-телефонная связь, радиосвязь и техника радиовещания будут развиваться еще на более высокий технический уровень.

Большой ряд задач, направленных на дальнейшее развитие применений электричества в быту, коммунальном хозяйстве, в медицинской практике, в кинотехнике и пр., должен быть решен в этой пятилетке в связи с директивами съезда о дальнейшем росте материального благосостояния, здравоохранения и культурного уровня народа. Рост численности рабочих и служащих в народном хозяйстве, повышение реальной заработной платы, с учетом снижения розничных цен не менее чем на 35%, значительное развитие жилищного строительства, улучшение и развитие здравоохранения населения, переход семилетнего образования на всеобщее среднее образование, введение в средней школе политического обучения, широкая подготовка квалифицированных кадров, рост выпуска художественной и научной литературы, учебников, журналов и газет и т. п. — таков далеко не полный перечень предполагаемых мероприятий в названных областях.

\* \* \*

Выполнение пятого пятилетнего плана является важным шагом вперед по пути развития нашей страны от социализма к коммунизму. Существен-

ной частью строительства материально-технической базы коммунизма является электрификация всей страны.

Задача электрификации народного хозяйства была поставлена Лениным с самого начала завоевания пролетариатом в союзе с беднейшим крестьянством политической власти как задача создания новой технической базы, соответствующей новому общественному строю. В своем выступлении на VIII Всероссийском съезде Советов Владимир Ильич Ленин обосновал решающее значение перевода хозяйства страны, в том числе и земледелия, на новую техническую базу, на техническую базу совершенного крупного производства, указав, что такой базой является только электричество.

Разработанная Лениным и Сталиным программа электрификации нашей страны имела исключительное значение в деле социалистического строительства. Первый план электрификации — план ГОЭЛРО — был высоко оценен товарищем Сталиным, как действительно единый и действительно государственный хозяйственный план. Советский народ под руководством большевистской партии добился успешного выполнения плана ГОЭЛРО в более сжатые сроки, чем предусматривалось самим планом. На всех последующих этапах социалистического строительства коммунистическая партия последовательно и неуклонно проводила в жизнь ленинско-сталинскую идею электрификации всего народного хозяйства.

По плану ГОЭЛРО намечалось в течение 10—15 лет ввести в действие 30 новых районных электростанций на общую мощность в 1 500 тыс. *квт* и довести выработку электроэнергии до 8,8 млрд. *квтч* в год. Известно, что через 15 лет, в 1935 г., мощность электростанций СССР превысила план ГОЭЛРО в 2,5 раза, а по выработке электроэнергии Советский Союз вышел на одно из первых мест в мире. В последующие годы мощность электрических станций и выработка электроэнергии на них быстро поднимались, и по темпам электрификации СССР обогнал все другие страны.

Тяжелый ущерб, нанесенный в ходе войны гитлеровскими варварами советской электроэнергетике, был восполнен в течение первого же послевоенного пятилетия. По плану восстановления и развития народного хозяйства на 1946—1950 гг. предусматривалось, что суммарная выработка электроэнергии по всей стране должна была составить к концу пятилетия 82 млрд. *квтч* в год. Фактическая же выработка электроэнергии в 1950 г. превысила 90 млрд. *квтч*, превысив на

87% довоенный уровень выработки электроэнергии. В 1951 г. электроэнергии было выработано уже более 103 млрд. *квтч*, что превзошло производство электроэнергии в Англии и Франции, взятых вместе.

Советом Министров СССР в 1950 г. по инициативе товарища Сталина были приняты важнейшие решения о строительстве Куйбышевской и Сталинградской гидроэлектростанций на Волге, Главного Туркменского канала, Каховской гидроэлектростанции на Днепре с Южно-Украинским и Северо-Крымским каналами, а также решения об ускорении строительства Волго-Донского канала с Цимлянкой гидроэлектростанцией на Дону. Общая установленная мощность гидроэлектростанций на Волге, Днепре, Главном Туркменском канале и на Дону превысит 4,2 млн. *квт*, а средняя годовая выработка электроэнергии только на этих станциях составит 22 млрд. *квтч*.

Первенец великих сталинских строек коммунизма — Волго-Донской судоходный канал имени В. И. Ленина с Цимлянской гЭС закончен строительством и вступил в эксплуатацию в текущем году.

В проекте директив XIX съезда намечается рост производства электроэнергии в 1955 г. по сравнению с 1950 г. примерно на 80%.

Общая мощность электростанций Советского Союза увеличится за пятилетие примерно вдвое, а гидроэлектростанций втрое, в части тепловых электростанций в первую очередь будет обеспечено расширение действующих предприятий. В текущем пятилетии в строй действующих будут введены новые крупные гидроэлектростанции: Куйбышевская на 2 100 тыс. *квт*, Камская, Горьковская, Мингечаурская, Усть-Каменогорская и др. общей мощностью 1 916 тыс. *квт*. Будет построена и сдана в эксплуатацию линия электропередачи Куйбышев—Москва. Впервые в мире мощность свыше 1 000 тыс. *квт* будет передаваться на расстояние около 1 000 км при напряжении 400 *кв*.

В соответствии с ранее установленными правительством сроками широко развернется строительство Сталинградской и Каховской гидроэлектростанций и будет начато строительство новых крупных гЭС: Чебоксарской на Волге, Воткинской на Каме, Бухтарминской на Иртыше и ряда других.

Для развития на базе дешевой электроэнергии и местных сырьевых источников алюминиевой, химической, горнорудной и других отраслей промышленности будут начаты работы по использованию энергетических ресурсов реки Ангары.

В целях серьезного улучшения электроснабжения Юга, Урала, Кузбасса в проекте указана необходимость обеспечения в этих районах значительного роста мощностей тепловых районных и заводских электростанций. Для обеспечения электроснабжения городов и районов наряду со строительством крупных электростанций будут осуществляться строительство небольших и средних электростанций.

В связи с задачами дальнейшей индустриализации выработка электроэнергии в Литовской ССР, Латвийской ССР и Эстонской ССР будет увеличена в 2...2,5 раза. С этой целью намечается построить Нарескую гидроэлектростанцию, Нарескую теплоэлектростанцию и развернуть строительство Каунасской гЭС.

Теплофикация городов и промышленных предприятий получает новое мощное развитие. В связи с этим предусматривается строительство теплоэлектростанций и теплосетей.

Энергетическое хозяйство страны в течение пятой пятилетки не только разрастается в количественном отношении, но и поднимается на более высокий технический уровень благодаря широкому применению автоматизации производственных процессов. На районных гидроэлектростанциях будет завершена полная автоматизация, а в энергетических системах начнется внедрение телемеханизации.

Как на особо важную задачу в машиностроении обращается внимание на необходимость полного обеспечения оборудованием электрических станций. Соответственно предусматривается значительное развитие производства турбин, генераторов, высоковольтной аппаратуры и различных приборов управления. Для выполнения задания по выпуску важнейших видов оборудования в 1951—1955 гг. будут построены и пущены новые заводы и закончена реконструкция действующих заводов энергетического машиностроения. Дальнейшее развитие электромашиностроения будет обеспечено, в частности, в Латвийской и в Эстонской ССР. Будут также укреплены строительные организации Министерства по строительству предприятий машиностроения, осуществляющие строительство заводов энергетического оборудования.

Обновление за годы четвертой сталинской пятилетки номенклатуры продукции электромашиностроения было обусловлено техническим прогрессом, достигнутым на передовых советских предприятиях. Новый крупный шаг по пути технического прогресса в борьбе за наилучшее выполнение заданий по пятому пятилетнему плану

стоят сделать в ближайшие годы коллектив прославленных орденоносных электромашиностроительных заводов: «Электросила», «Динамо», Московского трансформаторного, «Урал-аппарат», ХЭМЗ и многих других. Ближайшее техническое перевооружение народного хозяйства и повышение уровня механизации легких и тяжелых работ возможны только на базе передовой электротехники, быстро использующей новейшие достижения науки.

Советские электромашиностроители вышли в первые ряды современного гидро- и турбогенеростроения, трансформаторостроения, высоковольтного аппаратостроения и т. д. В советских научно-исследовательских организациях и заводах разработаны многие сложные и оригинальные технические проблемы, впервые возникающие в мировой практике в связи с грандиозным строительством, проводящимся в Советском Союзе. Решение этих проблем, имеющих также и большое теоретическое значение в области электротехники, прокладывает новые пути в науке и утверждает приоритет советской научной мысли. Советские специалисты, участвующие на великих стройках коммунизма, выдвигают ряд новых научных задач, вносят ценные технические предложения, имеющие исключительные перспективы. В качестве примера можно назвать оригинальное и перспективное предложение о комбинированном производстве электрической и тепловой энергии на гидроэлектростанциях, выдвинутое на строительстве Сталинград-гэс.

Множество работающих на великих стройках коммунизма машин и агрегатов по своему конструктивному совершенству, по производительности и мощности представляют первоклассные образцы, по которым в самое ближайшее время изготовлены десятки и сотни других. Творческая мысль советских инженеров и изобретателей продолжает рождать все более совершенные оригинальные конструкции и схемы. Например, на заводе «Динамо» им. Кирова разработан проект электрооборудования плуза Камской гидроэлектростанции, представляющий собою настоящее время последнее слово в области автоматического управления гидросооружением. На заводе «Электросила» им. Кирова выполняется заказ на первый гидрогенератор для Горьковской гэс. Конструкторами разработан новый уникальный гидрогенератор для Мингечаурской гэс, закончен разработкой технический проект гидрогенераторов для Куйбышевской гэс. На Московском трансформа-

торном заводе им. Куйбышева недавно закончена сборка сверхмощного высоковольтного трехфазного трансформатора, производство которого было освоено впервые. Создаваемые на этом заводе сверхмощные трансформаторы для Куйбышевской гэс и других крупных гидроэлектростанций являются уникальными конструкциями, в которых отражены самая передовая техника и оригинальные творческие идеи советских людей. Отечественному электромашиностроению предстоит освоить ряд новых электрических машин и аппаратов, мощность и размеры которых не имеют примеров в мировой технике. Так, например, мощность гидрогенераторов и гидротурбин для волжских гэс — гигантов — превышает 100 тыс. кВт, трехобмоточные трансформаторы для этих станций будут иметь мощность 370 тыс. кВт, а выключатели конструируются на напряжение 400 кВ с разрывной мощностью в 10 млн. кВА. Советским энергетикам предстоит разрешить серьезный комплекс вопросов, связанных с передачей электроэнергии на большие расстояния переменным и постоянным токами высокого напряжения.

Заслуженная роль в разработке и создании новых технически совершенных машин и агрегатов принадлежит успешно развивающемуся сотрудничеству ученых и производителей, которое в течение пятой пятилетки должно еще больше укрепиться и внести свой ценный вклад в осуществление технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства СССР. Как уже отмечалось выше, в проекте директив предусматривается рост грузооборота. Исходя из того, что важнейшей задачей в области железнодорожного транспорта признано увеличение пропускной способности железных дорог, наряду с проектируемым увеличением ввода в действие вторых путей намечено огромное ускорение сдачи в эксплуатацию новых электрифицированных железных дорог.

За пятилетие протяженность новых электрифицированных железных дорог в 4 раза превысит протяженность существующих в настоящее время электрифицированных дорог. Одновременно все железные дороги СССР будут все в большей степени оснащаться самой совершенной электрической аппаратурой. Количество стрелок, оборудованных надежной электрической централизацией, увеличится в 2,3 раза. Значительно увеличится применение новейшей диспетчерской централизации. Будут продолжены работы по внедрению радиосвязи для управления движением поездов и маневровой работой. Начнется



производство новых мощных электровозов. Потребность железнодорожного транспорта в электровозах согласно проекту директив XIX съезда подлежит полному обеспечению.

Дальнейшее развитие в пятой пятилетке получают средства связи. В 1955 г. протяжение междугородного телефонно-телеграфного кабеля увеличится не менее чем в 2 раза. Наряду с увеличением мощности и повышением качества работы существующих радиовещательных станций будут развернуты работы по внедрению ультракоротковолнового радиовещания и радиорелейной связи. Государственные капиталовложения в транспорт и связь, намечающиеся по пятому пятилетнему плану, составляют примерно 163% в сравнении с затратами в этой области за 1946—1950 гг.

Электрификация сельского хозяйства получает в пятом пятилетии исключительно широкое развитие. Районы орошаемого земледелия в зонах великих строек коммунизма, в первую очередь в зонах Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина и Куйбышевской гЭС, становятся районами сплошной электрификации сельского хозяйства. Помимо перевода на электропривод стационарных сельскохозяйственных машин: молотилок, зерноочисток, кормоприготовительных установок, водокачек, мельниц и т. п., в этих районах впервые в мире в широких масштабах будут переведены на электропривод тракторы, комбайны и другие полевые сельскохозяйственные машины.

В связи с этим перед советскими инженерами и конструкторами стоит ответственная задача дальнейшего усовершенствования электротракторов и электрокомбайнов с целью повышения их производительности и эксплуатационной надежности.

На протяжении последних трех лет на полях колхозов Свердловской, Рязанской и Киевской областей электротракторами обработаны десятки тысяч гектаров пахотной земли. На обработку 1 га пашни (в условной мягкой пахоте) электротрактор расходует в среднем 45 кВтч электроэнергии и экономит тем самым народному хозяйству примерно 18 кг жидкого топлива на каждый гектар пашни. Для электрификации полевых работ только в зоне Куйбышевской гЭС потребуются тысячи этих новых машин. Электрификация электротракторов будет сосредоточена в специально создаваемых для этого электромашинотракторных станциях (ЭМТС). Первые ЭМТС создаются уже в текущем году в зоне Цимлянской гЭС. Комплексная электрификация трудоемких работ в животноводческих хозяйствах охватывает

40...50 производственных процессов, выполняемых на колхозных фермах, и в результате в хозяйству высокий экономический эффект. Главнейшим показателем эффективности электрификации в колхозах и совхозах является экономия в рабочей и тяговой силе. Опыт работы механизированных колхозов показывает, что на каждые 1 000 кВтч электроэнергии, затраченной на электрификацию производственных процессов (электропривод сельскохозяйственных машин), достигается экономия в 300 чел.-дней и 10 недней. Если учесть, что в 1950 г. в колхозах работало более 36 000 электродвигателей общей мощностью 215 тыс. кВт, то экономический эффект от сельской электрификации только в отношении экономии труда и конной тяги является уже сегодня значительным. При том внимании, которое уделяют сельской электрификации партия и правительство, ее развитие в ближайшие годы получит небывало широкий размах и будет способствовать подъему на более высокий технический уровень сельскохозяйственного производства, постепенному стиранию в сельском хозяйстве граней между работниками физического и умственного труда.

Осуществление нового пятилетнего плана возможно только при условии дальнейшего расширения научной и инженерно-конструкторской мысли, решение целого ряда актуальных научно-технических проблем и дальнейшее внедрение во все области народного хозяйства современной техники, как правило, тесно связаны с новыми изменениями электричества и с разработкой передовых методов в уже освоенных ранее областях электротехники. Особое значение приобретает внедрение электроавтоматики для управления электрифицированными машинами и аппаратами. Электроавтоматика значительно повышает производительное использование машин, качество изделий и снижает брак продукции. Высокоростные методы обработки изделий будут в новой пятилетке развиваться особенно широко. Огromный рост выработки электроэнергии обеспечит решительные качественные сдвиги в развитии многих отраслей промышленности. Дешевая электроэнергия будет способствовать: разработке новых оригинальных и разнообразных машин, переводу ряда механизмов на электрический привод, организации новых технологических процессов, основанных на применении химических, тепловых и других действий электричества, превращении основных технологических процессов в электрические. Электрозакалка, электроэрозия, индукционный и высокочастотный нагрев, элект-

рка, электросушка и т. д. — все эти высокопроизводительные методы промышленной обработки будут в пятой пятилетке развиваться особенно быстро благодаря увеличению выработки и снижению электроэнергии с вступлением в строй действующих предприятий новых крупнейших ГЭС.

Яркой иллюстрацией новых масштабов энергоснабжения в годы осуществления пятого пятилетнего плана может служить такой пример: обеспечения энергетических нужд высотного здания Московского государственного университета потребуется мощность порядка 60 000 квт; почти равно мощности первенца советской энергетики — Волховской ГЭС.

Громадные масштабы энергетического строительства, предусмотренные проектом директив по пятому пятилетнему плану, предполагают широкое применение комплексной механизации строительных работ и внедрения скоростных методов строительства и монтажа. Это определяет ответственные задачи по дальнейшему совершенствованию строительной техники и улучшению организации строительного производства.

Перед советскими учеными — физиками, электриками и энергетиками — стоят очень ответственные и сложные задачи, связанные с выполнением заданий пятилетнего плана по строительству и эксплуатации новых гидроэнергетических сооружений, сверхмощных линий электропередач, новых рогенераторов, трансформаторов, коммутационных устройств и пр. Ряд серьезных задач предстоит разрешить в области электротехнических материалов, кабельной и измерительной техники. Методы и средства лабораторных исследований должны подняться на более высокую ступень своего развития.

Научные силы страны должны быть полностью использованы для решения важнейших вопросов развития народного хозяйства, для обобщения производственного опыта, для укрепления связи научно-исследовательских институтов и учебных институтов с производством. Руководство институтов и лабораторий должно всемерно содействовать научным работам в разработке ими теоретических проблем во всех областях знания, стимулируя и поддерживая новые изыскания, изобретения и рационализаторские предложения в разнообразных направлениях современной электротехники и электроэнергетики.

При этом свободные научные дискуссии и обсуждения должны постоянно обеспечивать возможность критической проверки новых предложений, препятствуя образованию в научных кол-

лективах затхлой атмосферы и попыткам зажимать научной критики или ее «нейтрализации». Большая роль в этой борьбе принадлежит нашей периодической научно-технической печати. На страницах журналов должна критически освещаться жизнь научно-технических коллективов. Свободное, критическое рассмотрение в научно-технических журналах актуальных проблем современной науки и техники является важнейшим залогом здорового развития в этих областях новых прогрессивных идей.

Советским деятелям науки и техники, новаторам производства не свойственно успокаиваться на достигнутом. Творческое стремление идти все вперед и вперед, к новым достижениям, — эта характерная черта лучших деятелей советской культуры, ныне захватывает все круги советской научно-технической интеллигенции.

Разработка и внедрение новой техники, лучшее ее использование составляют одну из важнейших хозяйственно-политических задач на нынешнем этапе коммунистического строительства, к которому относится новый пятилетний план. Большие усилия должны приложить ученые и инженеры, умелое руководство должно проявить научные, хозяйственные и общественные организации, чтобы обеспечить необходимые темпы и высокое качество научно-исследовательских работ. Следует особо подчеркнуть, что в документах ЦК ВКП(б) к XIX съезду осуждена практика тех хозяйственных организаций, которые недооценивали значение внедрения новой техники и изобретений. Только близорукостью, граничащей с невежеством, можно объяснить позицию таких хозяйственников, которые недооценивают значение постоянной и теснейшей связи производства и науки.

Большое место в проекте директив по пятому пятилетнему плану отведено вопросам подготовки кадров для народного хозяйства квалифицированных кадров. В ближайшие годы будет приступлено к введению в средней школе политехнического образования. Выпуск специалистов всех родов из высших и средних специальных учебных заведений будет увеличен за текущее пятилетие примерно на 30...35%, а выпуск специалистов из вузов для важнейших отраслей промышленности, строительства и сельского хозяйства возрастет настолько, что в 1955 г. он составит по сравнению с 1950 г. примерно 200%. Вдвое по сравнению с предыдущей пятилеткой расширится подготовка научных и научно-педагогических кадров через аспирантуру высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов.

Большая роль в деле подготовки высококвалифицированных кадров электротехников, энергетиков, радиотехников принадлежит крупнейшим учебным институтам страны: Московскому энергетическому институту им. Молотова, Ленинградскому электротехническому институту им. Ульянова, Ленинградскому политехническому институту им. Калинина и многим десяткам других высших технических учебных заведений СССР. В деятельности названных институтов наряду с бесспорными успехами в постановке преподавания и в развитии научной работы имеется еще немало недостатков, устранения и изжития которых руководство и общественность институтов должны добиться в самый короткий срок, чтобы с честью выполнить почетные задачи, выдвигаемые проектом директив съезда перед советской высшей школой.

Партия всегда проявляла и проявляет особую заботу о политическом воспитании, просвещении трудящихся, о повышении их коммунистической сознательности. Выковывая кадры народной социалистической инженерно-технической интеллигенции, партия руководствуется мудрым указанием товарища Сталина: «... нам нужны не всякие командные и инженерно-технические силы. Нам нужны такие командные и инженерно-технические силы, которые способны понять политику рабочего класса нашей страны, способны усвоить эту политику и готовы осуществить ее на совесть» (Соч., т. 13, стр. 66).

Именно такие кадры, хорошо усвоившие последнее слово науки и техники и готовые отдать все свои знания и все силы делу служения нашей великой Родине, должна дать стране в этой пятилетке советская высшая школа.

Успехи советской науки и техники, советской культуры имеют международное значение и являются важным фактором укрепления лагеря мира. Расцвет науки и культуры в нашей стране — один из внушительных показателей превосходства социалистического строя над капиталистическим строем.

Мирное развитие советской экономики, начатое пятым пятилетним планом, небывалый подъем, осуществляемый в деле электрификации народного хозяйства СССР, противостоят экономике капиталистических стран, идущих по пути милитаризации народного хозяйства, получения наивысших прибылей для капиталистов и дальнейшего обнищания широких народных масс Трудящиеся Советского Союза, вдохновленные решениями XIX съезда Коммунистической партии с энтузиазмом будут бороться за осуществление новых величественных задач по пятилетнему плану.

Ученые и инженеры нашей страны, воодушевленные грандиозным размахом предстоящих работ, в тесном содружестве с работниками производства внесут свой творческий вклад в успешное развитие на наиболее современной технической основе народного хозяйства СССР.

Многотысячная армия энергетиков и электротехников нашей страны приветствует XIX съезд Всесоюзной Коммунистической партии (большевиков) и обещает направить все свои силы на выполнение заданной новым пятилетним планом величественной программы дальнейшей электрификации Советского Союза, начертанной великим и любимым вождем советского народа трудящихся всего мира товарищем Сталиным.



# Гидрогенераторы

**Инж. Н. П. ИВАНОВ и проф. Г. Н. ПЕТРОВ**

**Введение.** Гидрогенератор представляет собой синхронную машину, работающую в режиме генератора и преобразующую механическую энергию гидротурбины в энергию электрического тока.

Гидроэлектростанции, на которых работают гидрогенераторы, являются одним из важнейших звеньев в комплексе гидросооружений великого проекта коммунизма.

Гидрогенераторостроение в СССР развивается быстрыми темпами. В настоящее время наиболее крупные в мире гидрогенераторы изготовлены в Советском Союзе и успешно эксплуатируются на Щербаковской и Днепровской гидроэлектростанциях.

*Рассматриваются особенности современных гидрогенераторов большой мощности, применяемых на крупных гидростанциях. Дается описание основных конструктивных узлов машин различного исполнения. Статья имеет обзорный характер и предназначена для широкого круга читателей, желающих ознакомиться с элементами основного оборудования гидроэлектростанций большой мощности.*

синхронных машин. Однако при проектировании гидрогенераторов приходится учитывать, что параметры водяной турбины зависят от энергетических показателей водотока и характера гидротех-

нических сооружений, поэтому параметры и конструкция генераторов, приводимых турбиной, также связаны с характером источника водной энергии и типом гидроэнергетических сооружений. Так, на конструктивные особенности гидрогенераторов больших мощностей оказывают существенное влияние: вертикальный вал, относительно малая скорость вращения турбины, большие осевые усилия от реакции воды и веса вращающихся частей гидроагрегата, а также большая кратность угонной скорости вращения и большие маховые моменты.

Существуют гидротурбинные установки с горизонтальным валом; тогда генератор мало отличается от нормальной синхронной машины, хотя кратность угонной скорости вращения сохраняется высокой. Однако типовые гидротурбинные установки большой мощности выполняются обычно с вертикальным валом, исходя из условий общей компоновки гидроэлектростанции.

Поэтому в настоящей статье рассматриваются только гидроагрегаты с вертикальным валом.

На рис. 1 показана в разрезе крупная гидроэлектростанция с тихоходными агрегатами с вертикальным валом.

Сравнительно низкая скорость вращения гидрогенераторов приводит к большим габаритам по диаметру активной части машины и к относительно малым длинам. Для гидрогенераторов отношение диаметра ротора к его активной длине  $\frac{D}{l}$

достигает 10 и более, в то время как в паротурбогенераторах это отношение снижается иногда до 0,15. Эта особенность, а также большие осевые усилия и требование высоких маховых моментов приводят для гидрогенераторов к относительно большим удельным расходам материалов как активных, так и конструктивных.

Сравнительные данные общих весов для гидрогенераторов и паротурбогенераторов приводятся на рис. 2.

Гидроагрегат органически связан с гидроэнергетическим сооружением и потому проектирование гидрогенератора электростанции и турбины проводится согласованно.

Наименование электрических станций	$P$ , кв	$n$ , об/мин	$\frac{P}{n}$ , кв/об/мин	Давление на под- пятник, т
Щербаковская . . . . .	70 000	62	1 130	2 100
Днепровская . . . . .	90 000	83	1 080	1 000
Д. Кули . . . . .	108 000	120	900	1 000

В связи со строительством новых гидроэлектростанций рекордные значения параметров щербаковских машин должны быть в ближайшие годы превзойдены более чем в 1,5 раза.

Основная задача настоящей статьи — ознакомить читателей с устройством гидрогенераторов переменного тока большой мощности, с назначением и работой их основных узлов и с вопросами, возникающими в процессе проектирования гидрогенераторов и еще полностью не решенными.

Гидрогенераторы относятся к классу многополюсных синхронных машин с явно выраженными полюсами на роторе. По своим электромагнитным свойствам гидрогенераторы ничем существенно не отличаются от прочих явнополюсных

<sup>1</sup> Для оценки размеров электрической машины характерным является ее электромагнитный момент вращения, который, при выражении его в тоннометрах, равен  $\frac{P}{n}$ , где  $P$  — мощность, квт;  $n$  — скорость вращения об/мин. Иногда для простоты вместо момента вращения, рассматривают пропорциональную величину  $\frac{P}{n}$ .

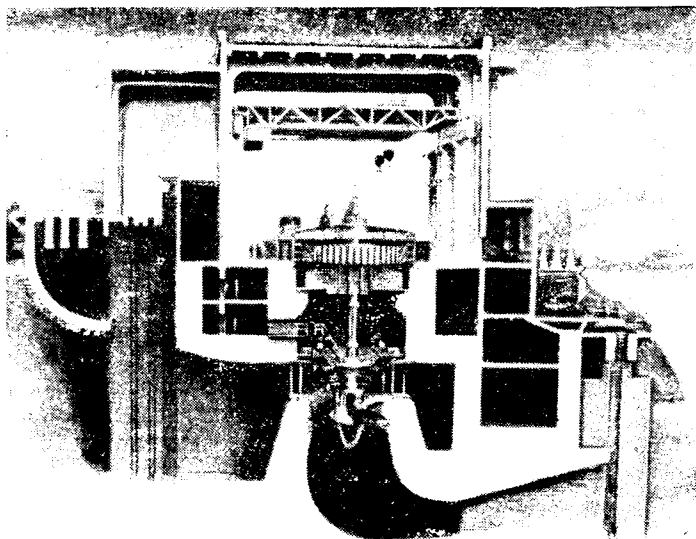


Рис. 1. Гидроэлектростанция в разрезе.

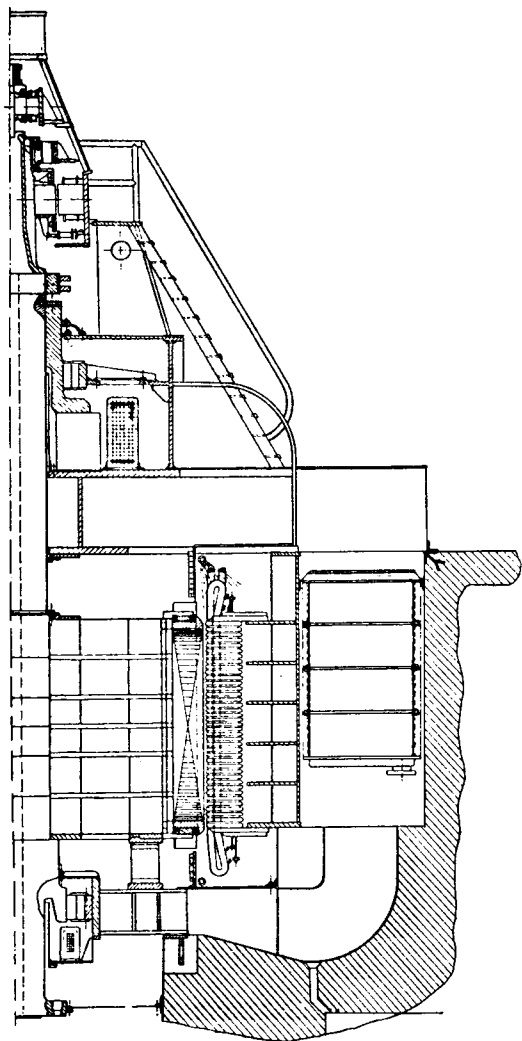


Рис. 3. Конструкция быстроходного гидрогенератора.

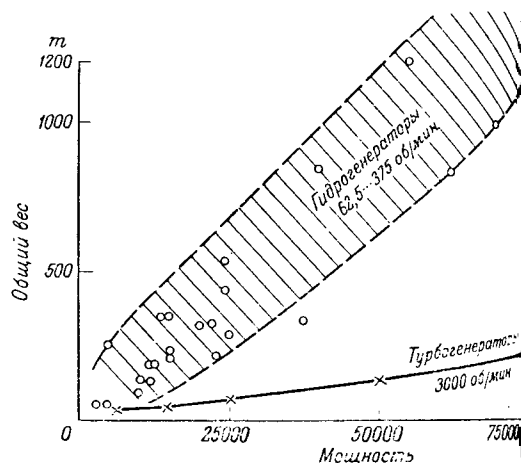


Рис. 2. Сравнительные данные общих весов генераторов и турбогенераторов.

**Зависимость параметров и конструкции гидрогенератора от характера гидроэнергетического сооружения.** Характер гидроэнергетического сооружения зависит от профиля русла реки. Горы реки с их крутым профилем русла и большой скоростью течения воды хорошо приспособлены для сооружения гидроэнергетических установок. Возможность получения высоких напоров воды при относительно малых расходах воды позволяет применять на горных гидроэлектростанциях (тихоходные агрегаты сравнительно меньшего веса и стоимости. Быстроходные гидрогенераторы выполняются с подпятником, расположенным на роторе гидрогенератора (подвесное исполнение, рис. 3). Стоимость их и вес на единицу мощности меньше, чем для тихоходных машин.

Для равнинных рек характерен пологий профиль русла, малая скорость течения воды, большие ее расходы. Гидроэлектростанции на таких реках характеризуются малыми напорами и относительно большими расходами воды, что приводит к применению тихоходных машинных агрегатов больших габаритов. Создание тихоходных гидрогенераторов больших мощностей представляет трудную задачу: увеличивается расход материалов, охлаждение машины затруднено вследствие слабого вентиляционного действия ротора, размеры грузонесущих крестовин возрастают с одновременным ростом нагрузок на них и на подпятники. В связи с большими габаритами и весами деталей тихоходных генераторов большой мощности возрастают технологические производственные трудности. Для облегчения веса и уменьшения габаритов тихоходных гидрогенераторов наряду с подвесными применяются также конструкции зонтичного типа с подпятником, расположенным под ротором генератора. Типичная конструкция тихоходного гидрогенератора показана на рис. 4.

Строгую грань между тихоходными и быстроходными генераторами провести трудно. Ориентировочно гидрогенераторы со скоростью вращения

\* 3 Сравнение гидрогенераторов подвесного и зонтичного типов будет дано ниже.

■ выше 187 об/мин могут быть отнесены к быстроходным, а ниже 80 об/мин к тихоходным. Гидрогенераторы в промежутке между 80 и 187 об/мин могут быть отнесены к быстроходным, так и к тихоходным в зависимости от их мощности.

Увеличение мощности гидрогенератора и достижения предельных окружных скоростей может быть получено лишь за счет увеличения осевой длины машины, что может привести к соотношению основных размеров машины  $\frac{D}{l}$ , характерных для быстроходных машин. Например, гидрогенератор мощностью 18 000 ква, имеющий при 187 об/мин  $\frac{D}{l} = \frac{8000}{760} = 10,5$ , должен быть отнесен к тихоходным, а гидрогенератор мощностью 90 000 ква, при 83,3 об/мин  $\frac{D}{l} = \frac{11600}{1800} = 6,5$  может быть отнесен к гидрогенераторам средней быстроходности.

Электростанция и водосливная плотина выполняются в виде отдельных гидротехнических сооружений или совмещаются частично или полностью. При полном совмещении гидрогенераторы устанавливаются в подводных машинных залах или погружаются в воду [Л. 1].

Конструкция таких гидрогенераторов специфична. Для возможности размещения в теле плотины гидрогенераторы должны иметь малые габариты, а число устанавливаемых на станции генераторов при этом возрастает. Монтаж гидрогенераторов, размещаемых в плотине, затруднен, и конструктор должен учитывать порядок операций при монтаже и ограниченность монтажного пространства.

На совмещенных водосливных гидроэлектростанциях иногда применяют горизонтальные гидроагрегаты небольшой мощности, которые хорошо встраиваются в плотину. Благодаря отсутствию поворотов потока воды во всасывающей трубе к. п. д. и мощность таких агрегатов несколько выше, чем вертикальных. Примерная конструкция таких гидрогенераторов показана на рис. 5 и 6.

При проектировании электростанции в первую очередь должно быть определено количество устанавливаемых на станции агрегатов.

**Выбор мощности агрегата.** При проектировании мощных гидроэлектростанций, соизмеримых уже построенными, выбор числа агрегатов проводится проектировщиками гидроэлектростанции на основе экономических расчетов. Они же разделяют и основные характеристики гидроагрегатов в пределах уже освоенных конструкций. Если же мощность проектируемой гидроэлектростанции выходит за пределы ранее построенных и для оборудования их не могут быть применены гидрогенераторы уже освоенных типов, то в этом случае вопрос о целесообразности мощности для конкретных условий решается машиностроителем совместно со строителями станции и энергетиками на основе разработки вариантов с учетом всех факторов: 1) общей мощности установки;

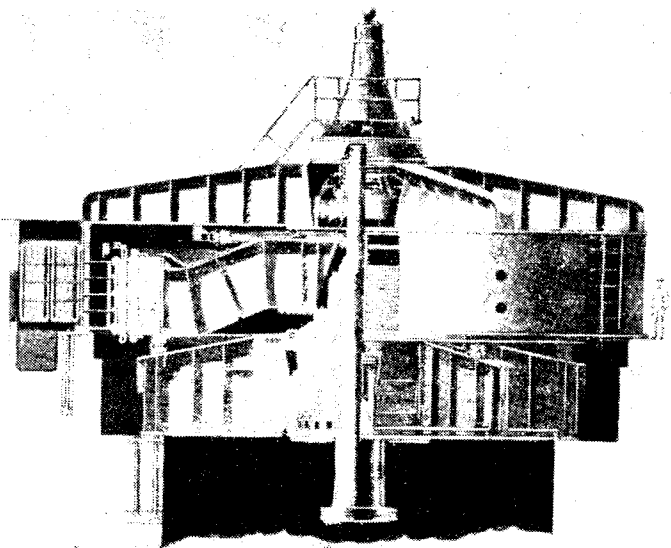


Рис. 4. Конструкция тихоходного гидрогенератора.

2) строительной компоновки сооружения; 3) скорости вращения гидроагрегата; 4) состояния техники гидротурбогенераторостроения; 5) габаритности деталей; 6) сроков изготовления.

Решение вопроса должно предусматривать получение наивысшей степени надежности гидроагрегата.

Необходимо отметить, что стоимость гидрогенераторов при заданной мощности станции мало зависит от их числа, так как при снижении мощности агрегата одновременно повышается скорость его вращения, благодаря чему вес генератора на единицу мощности сохраняется почти неизменным (табл. 1).

Как правило, при нормальной компоновке гидроэлектростанции проектировщики стремятся уменьшить число гидроагрегатов на станции с целью снижения затрат на строительные сооружения.

Таблица 1

Удельный вес гидрогенераторов в зависимости от числа агрегатов на станции

Число агрегатов на станции	Мощность станции, мва	Мощность одного агрегата, мва	Скорость вращения, об/мин	Удельный вес гидрогенераторов, кг/кка
1	103,5	103,5	83,3	9,5
4	100,0	25,0	167,5	9,4
10	100,0	10,0	250,0	9,9
23	99,0	4,3	375,0	11,6

Размеры и вес гидрогенератора при той же мощности приблизительно обратно пропорциональны скорости вращения<sup>3</sup>, но очень большая

<sup>3</sup> Это следует из равенства, справедливого для каждой электрической машины:  $D^2 l = C \frac{P}{n}$ , где  $P$  — мощность машины,  $C$  — постоянная величина, зависящая главным образом от электромагнитной загрузки активных материалов.  $D^2 l$  в этом равенстве может характеризовать размеры машины и ее вес.

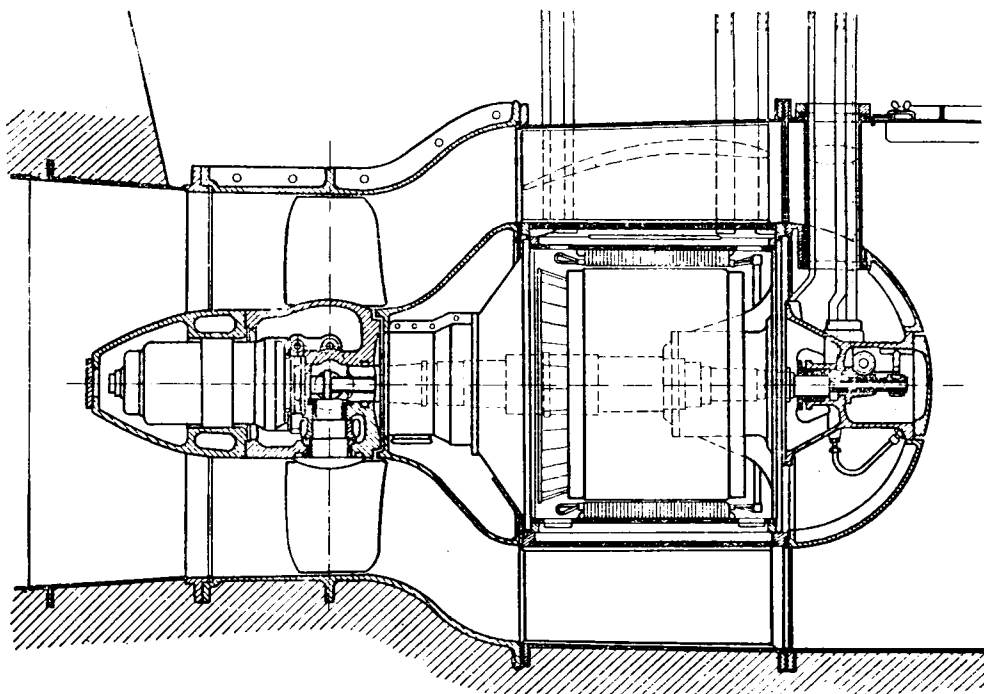


Рис. 5. Горизонтальный агрегат с асинхронным генератором.

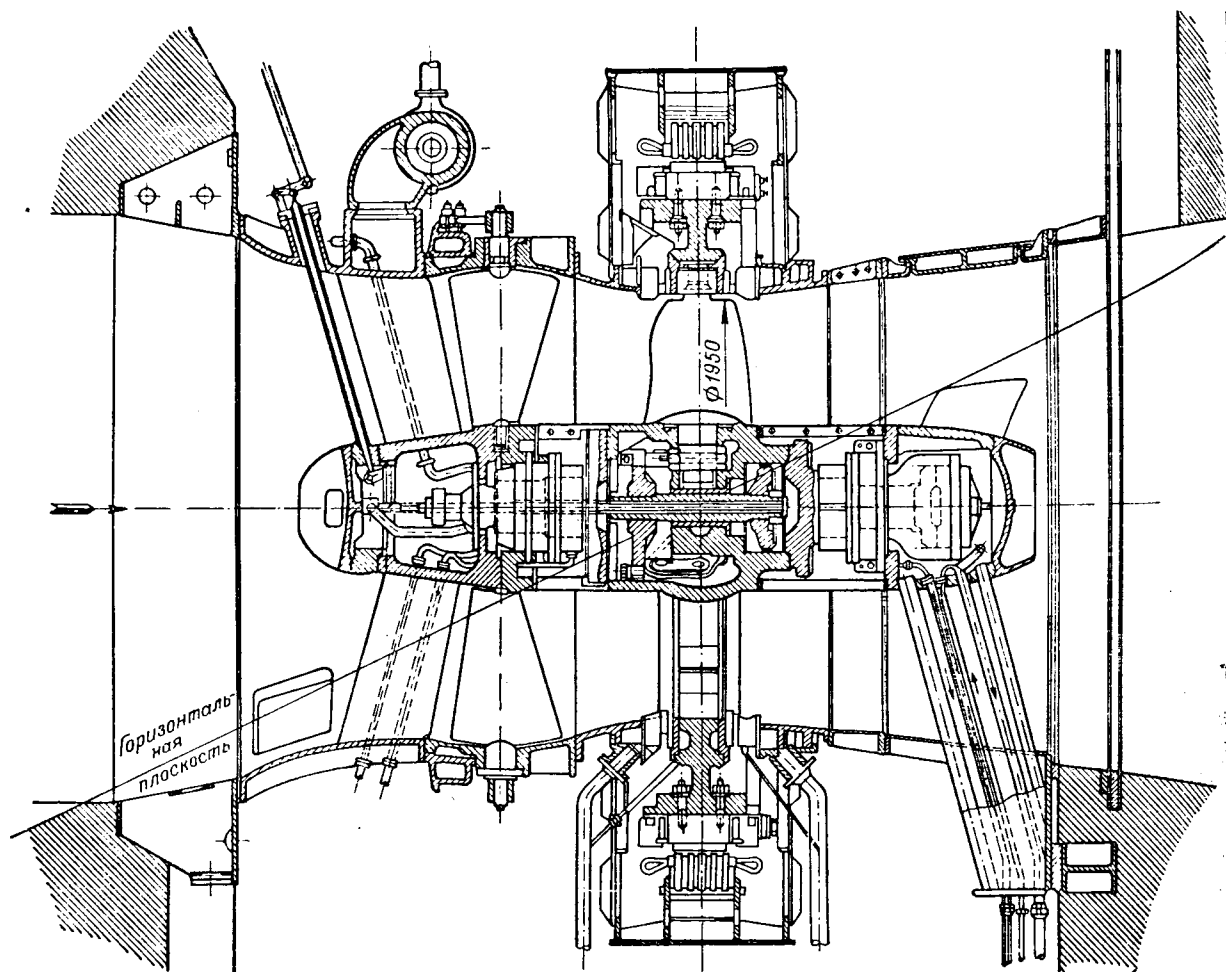


Рис. 6. Горизонтальный проточный агрегат.

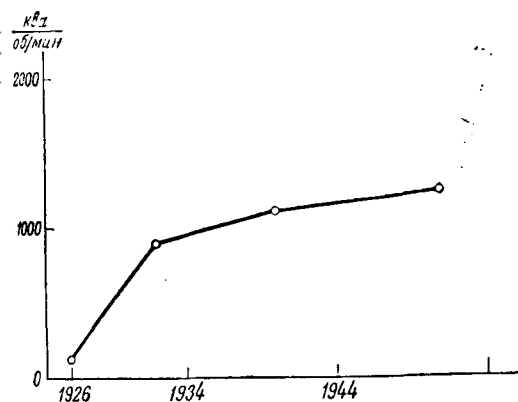


рис. 7. Рост мощности гидрогенераторов в одной единице.

юсть вращения вызывает трудности в создании механически прочной конструкции ротора, и тому скорость вращения является одним из факторов, влияющих на определение целесообразной предельной мощности гидроагрегата. Кроме того, предельная мощность гидрогенератора ограничивается предельным значением нагрузки на подшипники, которая может быть определена лишь для заданных конкретных условий достигнутого уровня техники гидрогенеростроения. Вследствие большой стоимости изготовления опытного образца исключается и поэтому при проектировании гидрогенераторов, в частности их подшипников, приходится базироваться в основном на опыте построенных машин и на данных, подкрепленных исследованием отдельных узлов гидрогенератора и явлений, происходящих в нем. Моделирование может быть также использовано при исследовании, но лишь в отдельных узлах и для изучения некоторых параметров, не связанных с масштабным фактором. негабаритные детали и узлы гидрогенератора возможности их перевозки делаются разборными. Однако некоторые детали по условиям прочности не могут быть выполнены разборными. Например, центральная часть грузонесущей крестовины и вал с фланцами и насаженными на него втулками. Возможности обработки и перевозки этих узлов могут ограничивать предельные мощности гидрогенератора. Несомненно, что предельная целесообразная мощность гидрогенераторов, как и всех электрических машин, с течением времени растет в связи с требованиями экономики, а также в связи с ростом производственных возможностей и совершенствованием техники проектирования. На рис. 7 показан рост электромагнитного момента вращения ( $\frac{\text{квт}}{\text{об/мин}}$ ) гидрогенераторов, построенных в Р.

**Основные технические условия для гидрогенератора.** Гидроагрегат со стороны генератора принадлежит к распределительной электрической сети, а со стороны турбины связан с источником энергии. Эти связи накладывают на гидрогенератор определенные требования как в ча-

сти электрических характеристик, так и в части механических свойств.

В части электрической к гидрогенераторам предъявляются требования, вытекающие из условий работы генератора в электрической системе. Эти требования в основном сводятся к обеспечению устойчивой работы гидрогенератора во всех режимах (статических и динамических), для чего должны быть выдержаны определенные значения (см. табл. 2):

1) реактивных сопротивлений, в частности переходного по продольной оси  $x_d'$  и продольного синхронного  $x_d$ ;

2) постоянной инерции<sup>4</sup> ротора генератора

$$T = \frac{2,74 \cdot GD^2 \cdot n^2 \cdot 10^{-6}}{P} [\text{сек}],$$

где  $GD^2$  — маховой момент ротора,  $\text{тм}^2$ ;

$n$  — номинальная скорость вращения,  $\text{об/мин}$ ;

$P$  — номинальная мощность генератора,  $\text{квт}$ ;

3) предельного (потолочного) напряжения возбуждения при форсировке и постоянной времени возбуждения;

4) зарядной мощности генератора;

5) параметров успокоительной обмотки (при ее наличии).

Таблица 2

Наименование	Нормальное значение
Синхронное реактивное сопротивление по продольной оси $x_d$ в относительных единицах . . . . .	0,75
Переходное реактивное сопротивление по продольной оси $x_d'$ в относительных единицах . . . . .	0,3
Постоянная инерции $T$ , сек . . . . .	10
Кратность напряжения возбуждения при форсировке <sup>5</sup> . . . . .	1,8

В части механических требований определяют типом конструкции рабочего колеса турбины и характеристикой гидроэнергетического сооружения; эти требования касаются: 1) угонной скорости вращения; 2) махового момента ротора; 3) осевого давления на подшипник.

Отношение угонной скорости вращения гидрогенератора к номинальной колеблется в пределах 1,8...2,5 и зависит в основном от конструкции колеса турбины и пределов колебаний напора воды.

Маховой момент ротора определяется условиями регулирования турбины, а также требованием динамической устойчивости гидрогенератора. Осевое давление на подшипник зависит от диаметра рабочего колеса турбины, максимального напора воды, а также веса вращающихся частей турбины и генератора.

**Конструкция гидрогенераторов.** Компоновка основных узлов. Конструктивная компоновка ос-

<sup>4</sup> Постоянная инерции равна времени, необходимому для изменения скорости вращения ротора от нуля до синхронной под действием номинального момента вращения при  $\cos \varphi = 1$ .

<sup>5</sup> Для некоторых специальных условий работы гидрогенератора требуется более высокая кратность, достигающая до 3...4.



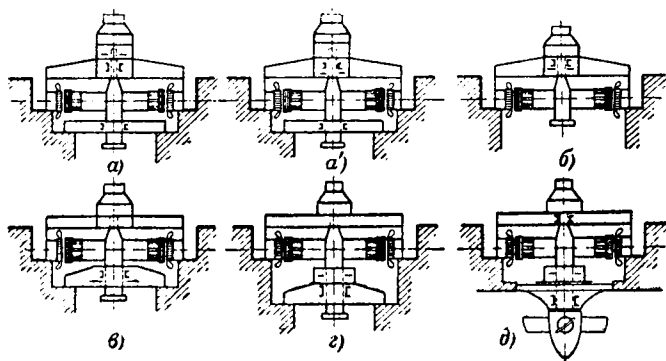


Рис. 8. Компоновка основных узлов гидрогенераторов. а — подвесное исполнение генератора с двумя направляющими подшипниками; б — то же, но с одним направляющим подшипником под ротором генератора, без нижней крестовины; в, г, д, е — зонтное исполнение генератора: в — с одним направляющим подшипником; расположенным под ротором, над подпятником; г — с одним направляющим подшипником, расположенным под ротором, под подпятником; д — с подпятником на крышке турбины и с одним направляющим подшипником, расположенным над ротором; е — с подпятником на крышке турбины и с одним направляющим подшипником, расположенным под ротором (на рисунке не показан).

новых узлов гидрогенератора — ротора, статора, подпятника, направляющих подшипников и крестовин — имеет целью обеспечить сопряжение неподвижных частей гидрогенератора с фундаментом и устойчивую в механическом отношении работу ротора при минимальных затратах материала и габаритах генератора, а также достижение максимального удобства обслуживания агрегата.

Вал генератора жестко связан с валом турбины и является его продолжением; конструктивная компоновка гидрогенератора может рассматриваться только в связи с общей компоновкой агрегата; также и устойчивая в механическом отношении работа генератора должна рассматриваться как зависящая от работы агрегата в целом.

При компоновке основных узлов учитываются: 1) механическая устойчивость ротора при вращении, 2) удобство эксплуатации и доступность узлов при ремонте и осмотре, 3) стоимость конструкции, ее трудоемкость и вес, 4) стоимость строительных сооружений, связанных с габаритами гидроагрегата.

По компоновке основных узлов гидрогенератора разделяются на подвесные, у которых подпятник расположен над ротором генератора, и зонтные с подпятником, расположенным под ротором генератора. Эти основные исполнения имеют свои модификации (рис. 8).

Подвесное исполнение генераторов является наиболее надежным по устойчивости ротора и пригодно для машин любой мощности и скорости вращения. Расположение подпятника над ротором имеет преимущества в части обслуживания, так как для полной разборки подпятника не требуется выемки ротора, а лишь легко осуществляемая с помощью крана разборка устройств, расположенных над подпятником. Два направляющих подшипника надежно центрируют вал генератора (рис. 8, а).

Модификация с одним направляющим подшипником, расположенным над ротором, без нижней крестовины позволяет снизить габарит агрегата по высоте (рис. 8, б).

В тихоходных машинах подвесного типа с увеличением диаметра статора удлиняется верхняя грузонесущая крестовина и одновременно с тем растет осевая нагрузка на нее. Крестовина утяжеляется и становится весьма громоздкой.

С целью снижения веса крестовины и уменьшения высоты агрегата применяют конструкцию генератора зонтичного типа с подпятником, расположенным под ротором генератора. Тогда диаметр грузонесущей крестовины определяется диаметром шахты под генератором, который значительно меньше диаметра статора, что позволяет сократить вес и габариты крестовины (рис. 8, в, г). Эта конструкция, однако, имеет некоторые недостатки:

1) работа с подпятником, находящимся под ротором и вне зоны действия подъемного устройства затрудняется; 2) диаметр подпятника увеличивается, так как он должен пропустить себя фланец вала генератора при сборке и разборке. Увеличиваются также потери в подшипниках (на 20—25 %).

Модификация этой конструкции (рис. 8, д), направляющий подшипник генератора под ротором помещен ниже подпятника, имеет то преимущество по сравнению с конструкцией рис. 8, в, г, что ванна подпятника служит лишь резервуаром для масла и не воспринимает радиальных усилий.

Это обстоятельство чрезвычайно облегчает конструкцию узла подпятника и создает возможность иметь ванну подпятника легко разбираемой, что очень важно как для транспортировки, так и для эксплуатации.

При большой высоте агрегата не всегда можно ограничиться одним направляющим подшипником, расположенным под ротором, и возникает необходимость установки второго подшипника над ротором гидрогенератора.

В последнее время применяется конструкция с подпятником, расположенным на крышке турбины, являющаяся дальнейшим развитием зонтичной конструкции. В этом случае грузонесущая крестовина отсутствует, а для восприятия осевого давления крышка турбины и направляющий агрегат соответственным образом усилены (рис. 8, е). Такая конструкция применяется с целью дальнейшего сокращения высоты агрегата. Экономия стоимости агрегата при этом незначительна, так как снижение стоимости генератора поглощается увеличением стоимости турбины из-за усложнения крышки и направляющего аппарата. Однако стоимость строительной части сооружения станции снижается весьма значительно вследствие уменьшения общей высоты гидроагрегата.

Выбор типа конструкции гидрогенератора — зонтичной или подвесной — является ответственным моментом проектирования. С точки зрения удобства и надежности эксплуатации предпочтение должно быть отдано подвесному типу. Однако сокращение высоты агрегата может быть весьма значительной экономией стоимости сооружения, поэтому выбор типа конструкции должен быть обоснован расчетами стоимости всего сооружения станции в целом.

Если стоимость строительной части сооружения остается практически одинаковой как зонтичного типа конструкции, так и при подом, то предпочтение должно быть отдано весному типу.

Габариты гидроагрегата определяют в известной мере стоимость как надводной части гидроэлектростанции, так и, в особенности, ее подводной части. Размеры и стоимость здания станции зависят от размеров вала и веса ротора, определяющего грузоподъемность крана. Изменение габаритов подводной части гЭС может весьма существенно отразиться на стоимости последней.

Ротор гидрогенератора непосредственно связан с вращающимся колесом турбины при помощи вала. Необходимо обеспечить механическую прочность ротора во всех режимах его работы как номинальной, так и при угонной скорости вращения. Должна быть исключена возможность возникновения резонансных поперечных колебаний ротора при номинальных и при повышенных скоростях вращения.

Кроме того, по условиям регулирования турбины, а также для создания необходимой динамической устойчивости генератора при неустойчивых режимах, должен быть обеспечен заданный минимальный маховой момент ротора. Размеры ротора — его диаметр  $D$  и осевая длина  $l$  определяются, исходя из заданной мощности генератора, а также заданного махового момента с учетом угонной скорости вращения гидроагрегата<sup>6</sup>.

Для тихоходных машин большой мощности целесообразно увеличивать диаметр ротора до предела, ограниченного механической прочностью материала. Увеличением диаметра ротора достигается лучшее охлаждение машины и снижение веса ротора при заданном маховом моменте. С этой целью и в целях снижения угонной скорости вращения гидроагрегата оказывает весьма существенное влияние на стоимость гидрогенератора.

Конструкция ротора гидрогенератора состоит из вала, остова, обода и полюсов (рис. 4).

Вал ротора передает вращающийся момент от турбины к полюсной системе генератора, воспринимает осевые усилия от веса вращающихся частей гидроагрегата и от реакции воды.

Вал генератора должен быть достаточно жестким, чтобы исключить возможность возникновения резонансных поперечных колебаний при высоких и угонных скоростях вращения. Обычно для обеспечения жесткости диаметр вала выбирается большим, чем это требуется по расчету на прочность, вследствие этого материал вала имеет повышенные механические напряжения, допускающие применение при изготовлении вала простых легированных сталей.

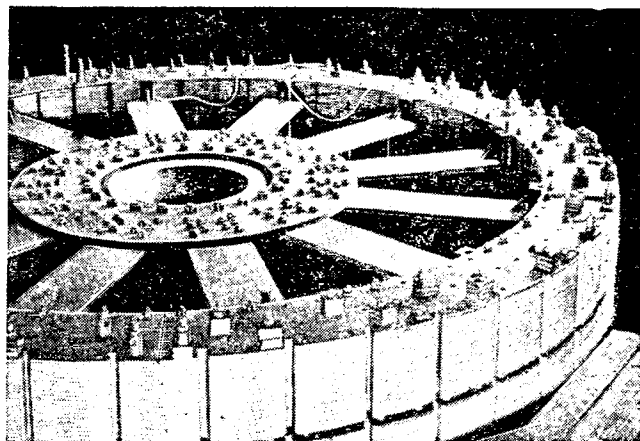


Рис. 9. Спицевой остов ротора с шихтованным ободом.

Остов ротора, как правило, выполняется сварным и, редко, литым. Вследствие больших моментов вращения, передаваемых остовом ротора, наиболее ответственным является крепление его на валу. Должна быть обеспечена необходимая прочность соединения и одновременно возможность разборки этого соединения для выемки ротора. Наилучшим образом это достигается путем применения фланцевых соединений.

Размеры остова ротора достигают по диаметру 10 м и более, поэтому конструкция его должна предусматривать возможность транспортировки частями. Применяются два типа конструкции остова ротора — дисковые и спицевые, разборные, применение которых определяется габаритными размерами остова. До 4 м в диаметре применяются неразъемные дисковые остовы, до 8 м диаметром могут применяться разъемные дисковые и свыше 8 м диаметром — спицевые разборные остовы роторов. Дисковые остовы роторов имеют наиболее простое устройство и легко воспринимают усилия вращающего момента. Спицевые разборные остовы более трудоемки, так как болтовое крепление каждой спицы (рис. 9) к диску должно быть рассчитано на передачу соответственной доли вращающего момента.

Остов ротора является промежуточным звеном в креплении обода ротора с валом. Обод ротора служит для укрепления полюсов и для создания необходимого махового момента. При вращении ротора в обode возникают большие центробежные усилия от собственного веса и веса укрепленных к ободу полюсов. На восприятие этих усилий при угонной скорости вращения должен быть рассчитан обод. Размеры обода по диаметру не допускают его транспортировку в собранном виде (за исключением небольших гидрогенераторов), и потому конструкция его выполняется разборной путем шихтовки штампованных сегментов (рис. 9). Эта конструкция настолько технологична, что она применяется также и в ободах с размерами, допускающими транспортировку в собранном виде.

Для повышения махового момента целесообразно максимально увеличить диаметр ротора и его окружную скорость, однако напряжения в

В основу определения диаметра  $D$  ротора или внутреннего диаметра  $d$  статора при частоте 50 гц может быть положено [Л. 2] равенство  $\tau = (8,9 \dots 8,35) \left( \frac{P_{квд}}{p_{1,5}} \right)^{0,29}$  с.м., — число пар полюсов,  $\tau$  — полюсное деление статора,  $p$  — равно окружной скорости вращения ротора,

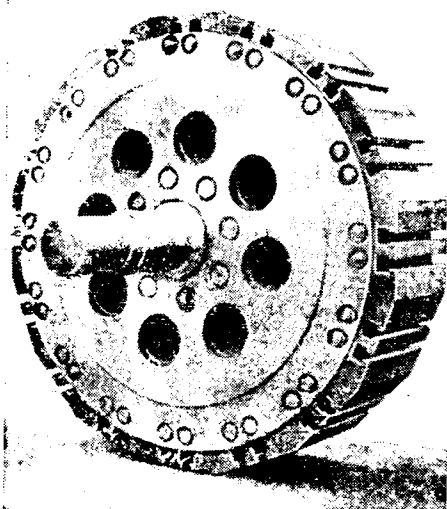


Рис. 10. Остов ротора быстроходного гидрогенератора.

обода при угонной скорости вращения получают очень высокими и нередко достигают трех четвертей и выше от предела текучести применяемого материала.

Большой диаметр обода и высокие напряжения в нем обуславливают и большую деформацию его под действием центробежных сил. Эта деформация может достигнуть при угонной скорости вращения нескольких миллиметров на диаметр и вызвать смещение центра тяжести ротора и вибрацию. Поэтому принимаются меры, чтобы положение обода относительно центра вала все время сохранялось. Это достигается применением направляющих шпонок или горячей насадкой обода на остов. В последнем случае остов ротора должен быть рассчитан на восприятие посадочных напряжений, в связи с чем конструкция его должна быть соответственно усилена.

В быстроходных гидрогенераторах обод ротора совмещается с остовом (рис. 10). В этом случае корпус ротора набирается из толстых стальных плит и обрабатывается под насадку на вал и для крепления полюсов. В гидрогенераторах малых мощностей ободы выполняются литыми и полюсы крепятся болтами. Крепление полюсов к штампованному ободу ротора производится при помощи Т-образных или ласточкиных хвостов.

Конструкция обмоток возбуждения гидрогенераторов отличается от нормальных исполнений, применяемых в синхронных машинах, повышенной электрической прочностью изоляции, так как необходимо учитывать трудности смены полюсов при нарушении изоляции и повышение напряжений при форсировках возбуждения.

Конструкция междуполюсных соединений должна учитывать возможность вибрации катушек, в связи с чем эти соединения должны выполняться гибкими.

Гидрогенераторы в ряде случаев снабжаются успокоительными обмотками на роторе с целью снижения перенапряжений в сети при некоторых аварийных режимах работы гидрогенератора, повышения асинхронных моментов при неустано-

вившихся режимах и возможности осуществления самосинхронизации.

Опыт работы ряда гидрогенераторов без успокоительных обмоток на электростанциях не выявил существенных недостатков в эксплуатации, связанных с отсутствием успокоительных обмоток. Вместе с тем на отдельных гидрогенераторах выявилась уязвимость успокоительных устройств в эксплуатации и в ряде случаев место аварии. Учитывая практические трудности осуществления успокоительных обмоток для роторов больших габаритов, при решении вопроса об их применении следует убедиться, насколько они необходимы. При конструктивном оформлении успокоительных обмоток необходимо учитывать возможность незначительных колебаний полюсов и соединения отдельных сегментов должны выполняться эластичными.

Короткозамыкающие сегменты должны надежно закреплены во избежание деформаций их при угонной скорости вращения. Термическая устойчивость успокоительных обмоток и возможность возникновения резонансных вибраций, вызванных знакопеременным моментом обмотки вращающегося поля, накладывает некоторые ограничения на допустимые несимметричные режимы гидрогенератора.

Статор состоит из корпуса, магнитного сердечника и высоковольтной обмотки (рис. 4). Корпус — сварной из листовой стали служит для сборки и крепления пакетов сердечника, которые изготавливаются из штампованных листов электротехнической стали, имеют пазы для размещения обмотки и отделены друг от друга радиальными каналами для охлаждения. В генераторах тяжелого типа корпус передает на фундамент вибрация, воспринимаемые верхней крестовиной. Корпус с магнитным сердечником при наружном диаметре выше 4 м по условиям перевозки должен быть выполнен разъемным, состоящим из отдельных секторов. Связанные в одно целое отдельные секторы должны представлять собой монолитную конструкцию, противостоящую электромагнитным вибрациям, вызываемым протекающим магнитным потоком, а также возникающим вследствие температурных деформаций сердечника. При проектировании статора должно быть уделено особое внимание температурным напряжениям в его узлах.

Магнитный сердечник вследствие нагрева имеет стремление увеличиться в диаметре, что этому препятствует корпус статора вследствие своей жесткости, а также жесткости крепления к фундаменту. Эти деформации вызывают большие напряжения в местах крепления сердечника к корпусу и в соединениях отдельных частей статора. В практике эксплуатации наблюдались случаи разрушения этих узлов. Для обеспечения надежной работы статора применяется особое крепление сердечника к корпусу, рассчитанное таким образом, чтобы температурные напряжения оказались в допустимых пределах.

В целях снижения температурных напряжений может быть применено эластичное крепление сердечника (рис. 11).

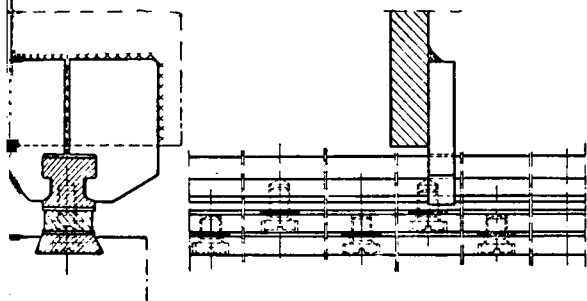


Рис. 11. Эластичное крепление активной стали к корпусу статора.

Вследствие больших габаритов корпус крупных гидрогенераторов не может быть обработан в собранном виде. Конструкция корпуса предусматривает обработку отдельных частей, которые потом свариваются с большой точностью, обеспечивающей правильное положение магнитного сердечника в машине.

Статорная обмотка выполняется обычно на стандартное напряжение 6,3 или 10,5 кВ, а в больших гидрогенераторах, по условиям коммутации больших токов, это напряжение повышается до 13,8 кВ и выше.

Из условий надежности витковой изоляции статорные обмотки рекомендуется выполнять ленточного типа с числом эффективных проводников в пазу 2, для гидрогенераторов средней мощности выполняются также обмотки катушечного типа с числом эффективных проводников в пазу более двух.

Трудоемкость изготовления этих обмоток несколько ниже вследствие отсутствия транспозиции отдельных проводников и более легкой пайки соединений.

Как правило, изоляция обмоток выполняется прерывной из micaленты с компаундировкой под давлением после вакуумной сушки. Эта изоляция хорошо противостоит увлажнению и менее подвержена разрушению от коронирования. С целью снижения коронирования и сохранения наружного слоя изоляции применяются покрытия защитной поверхности обмотки полупроводящими лаками в пазовой части и в лобовых частях обмотки у выходов из крайних пакетов.

Вследствие сравнительно малого полюсного деления в гидрогенераторах лобовые части обмотки имеют небольшие вылеты и потому обладают

высокой механической прочностью и надежно выдерживают усилия при коротких замыканиях.

**Крестовины**, воспринимающие и передающие на фундамент осевые усилия, называются грузонесущими. Для сочленения вращающегося ротора с неподвижными крестовинами применяются подшипники и подпятники; подпятники для восприятия осевых усилий и подшипники для радиальных. Крестовины также служат для размещения вспомогательных устройств: возбuditелей, комбинатора турбины, тормозных устройств и др. Крестовины должны быть достаточно жесткими и прочными для того, чтобы обеспечить стабильное положение ротора при его вращении, должны обеспечивать доступ к подпятнику и подшипникам по возможности без разборки машины. Наконец, конструкция и размеры крестовины должны допускать ее транспортировку.

Крестовины бывают лучевые и мостовые. Мостовые выполняются в виде балки сложного сечения, лежащей на двух опорах (рис. 12).

Крестовины этого типа легки в изготовлении и имеют простейшую схему нагрузок и деформаций балки, работающей на изгиб. Напряжения в сварных швах в этом случае невелики. Однако при возрастании осевых нагрузок и изгибающих моментов трудно обеспечить симметричную во всех направлениях деформацию средней части крестовины, служащей основанием для подпятника. Вследствие несимметричных деформаций может возникнуть неправильное распределение давления между сегментами подпятника. Поэтому при больших нагрузках применяются лучевые крестовины, которые обеспечивают симметричную деформацию основания подпятника.

Лучевые крестовины состоят из центральной части и прикрепленных к ней лап или лучей (рис. 13). Конструктивная схема такой крестовины гораздо сложнее. Балки состоят по длине как бы из трех частей, средняя часть балок — центральная часть крестовины, одна для всех балок-лучей. При наличии большого числа разъемных соединений изготовление лучевых крестовин значительно сложнее, чем мостовых.

Грузонесущие крестовины могут быть простые и сложные. Простые выполняют лишь роль опоры для подпятника (рис. 13). Сложные, кро-

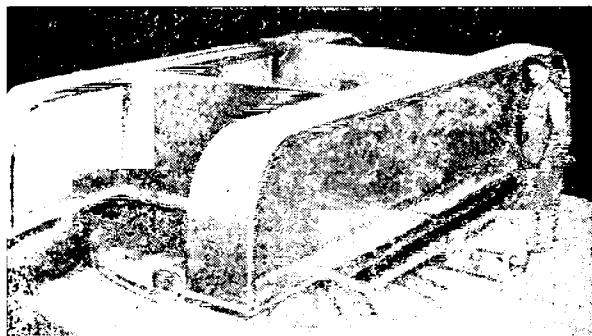


Рис. 12. Мостовая крестовина.

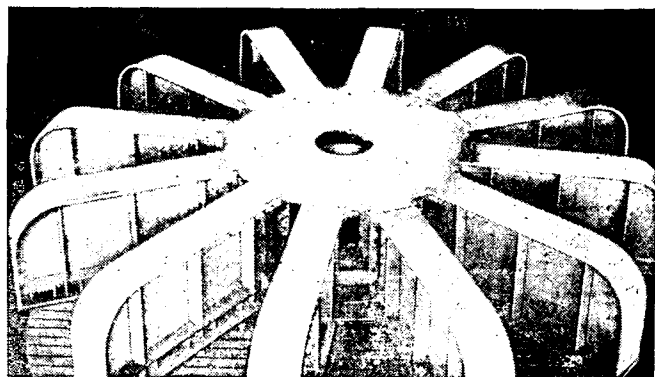


Рис. 13. Лучевая крестовина.

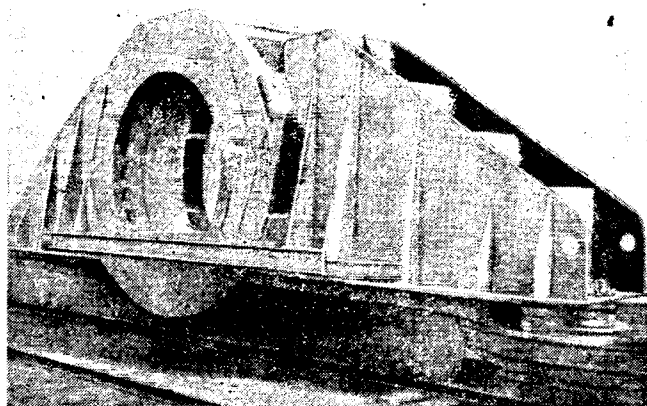


Рис. 14. Центральная часть грузонесущей крестовины на транспорте.

ме того, имеют встроенную ванну подпятника (рис. 4). С точки зрения проектирования и изготовления предпочтительны простые крестовины. В эксплуатационном отношении также предпочтительны простые, обеспечивающие большую доступность к подпятнику. Однако с целью сокращения высоты агрегата применяются и сложные крестовины. Они дают сокращение высоты генератора примерно на высоту подпятника.

По расходу материала оба типа крестовин примерно равноценны. Невоспринимающие осевых нагрузок крестовины, в которые встраиваются лишь направляющие подшипники, также выполняются мостовыми или лучевыми. Последние обеспечивают более жесткую конструкцию, одинаково противостоящую во всех направлениях действию радиальных усилий.

Крестовины выполняются сварными из листовой стали. Вследствие больших напряжений в сварных швах и сложной конфигурации они обычно подвергаются отжигу.

Мостовые крестовины в своем силовом узле вписываются в железнодорожный габарит и, как правило, не имеют разъемных соединений. Лучевые имеют отъемные лапы для возможности транспортировки. Размеры центральной части крестовины не должны выходить за пределы транспортных габаритов. Для очень крупных машин центральная часть может транспортироваться только в специальном приспособлении (рис. 14).

**Подпятники и подшипники**, передающие на крестовину усилия, возникающие при вращении ротора, воспринимают те же усилия, что и крестовина. Эти усилия очень велики. Достаточно сказать, что в построенных машинах усилия на подпятник достигают свыше 2000 т, а усилия на подшипники свыше 300 т. При таких больших нагрузках подпятники становятся одним из самых сложных и ответственных узлов гидроагрегата.

Для того чтобы можно было воспринять эти нагрузки, необходимо обеспечить минимальный коэффициент трения трущихся поверхностей. Как известно, минимальный коэффициент трения до-

стигается при жидкостном трении, когда трущиеся металлические поверхности при вращении соприкасаются друг с другом, а их разделяет тонкий слой жидкой смазки. Если масляная пленка нарушается, то жидкостное трение переходит в полусухое или сухое, при котором сопротивление трению резко увеличивается.

Теория подпятников изучает условия возникновения и устойчивости масляной пленки.

В основе современной теории жидкостного трения лежит опытный закон Ньютона, согласно которому сопротивление вязкой жидкости с

$$P_{\tau} = \lambda S \frac{dv}{dh} [\kappa\epsilon],$$

где  $\lambda$  — абсолютная вязкость жидкости,  $\kappa\epsilon\text{с}/\text{см}^2$ ;  $S$  — поверхность жидкостного слоя ( $\text{м}^2$ ), заключенного между двумя поверхностями, движущимися относительно друг друга со скоростью  $v$  м/сек;

$\frac{dv}{dh}$  — изменение скорости жидкости в направлении толщины смазочного слоя.

Если сравнить этот закон с законом скользящего трения твердых тел, где сопротивление трению  $P_T = \mu P$ , то увидим, что закон жидкостного и сухого трения различны: если сопротивление сухому трению зависит от коэффициента пары трения и от давления и не зависит от поверхности, то при жидкостном трении сопротивление сдвигу не зависит от давления, а зависит от поверхности трения, вязкости жидкости и изменения скорости сдвига по толщине смазочного слоя.

Отсюда можно сделать следующие практические выводы в применении к подпятникам и подшипникам.

1. Потери на трение будут тем больше: а) чем выше вязкость смазочного материала, которая зависит как от сорта масла, так и от его температуры; б) чем больше поверхность трения; в) чем меньше толщина смазочного слоя при данной относительной скорости движения трущихся поверхностей (предполагается, что  $\frac{dv}{dh} = \text{const}$ ).

2. Между этими тремя факторами ( $\lambda$ ,  $S$ ,  $\frac{dv}{dh}$ ) имеется взаимосвязь, например: при изменении вязкости смазки меняется толщина смазочного слоя, а отсюда и  $\frac{dv}{dh}$ ; при изменении поверхности трения толщина смазочного слоя также меняется. Давление на подпятник также влияет на толщину смазочного слоя и на потери трения. Таким образом, уменьшение вязкости смазки и поверхности трения, а также увеличение нагрузки ограничиваются возрастанием  $\frac{dv}{dh}$ , так работоспособность подпятника или подшипника определяется его тепловым балансом и минимальной толщиной смазочного слоя для получения жидкостного трения.

3. Основная задача при конструировании подпятников или подшипников заключается в

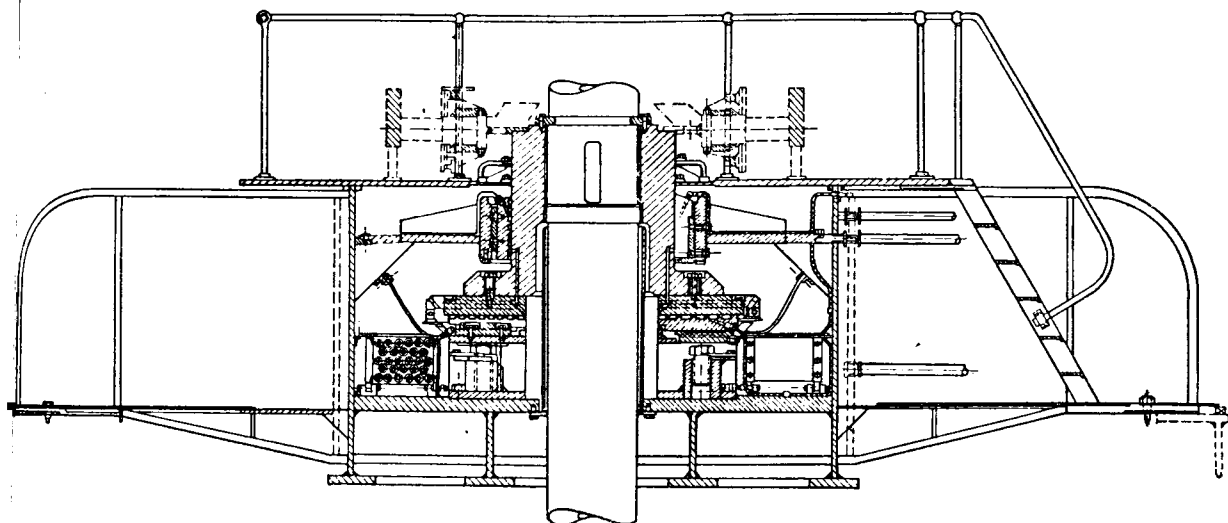


Рис. 15. Подпятник.

ни условий, обеспечивающих получение достаточной по толщине и устойчивой масляной пленки между плоскостями трения. Эту задачу помогает решить теория жидкостной смазки, впервые примененная к подшипникам в 1883 г. известным русским ученым профессором Н. П. Петровым.

Современные подпятники строятся таким образом, что сегменты<sup>7</sup> имеют возможность изменять угол наклона между плоскостями трения. Этот угол наклона сегментов устанавливается автоматически, в зависимости от нагрузки, скорости вращения, вязкости масла и геометрии сегмента, и определяется условиями растекания смазки под сегментом. Принцип самоустанавливающихся сегментов положен в основу проектирования наиболее совершенных современных подпятников.

Однако существуют подпятники, не имеющие самоустанавливающихся сегментов. В этих случаях для получения устойчивой масляной пленки существуют какой-то постоянный угол наклона между плоскостями трения, определяемый расчетом для средних условий; при параллельном поведении плоскостей трения принимаются меры против растекания смазки. В качестве примеров можно привести подпятники фирмы GEC на пружинном основании и текстолитовые подпятники. Первый из названных конструкций одна из плоскостей трения представляет собой тонкий эластичный диск, имеющий эластичное основание. Под действием давления, существующего в рабочем слое, диск деформируется и в поперечном сечении принимает вид лотка, что уменьшает боковые зазоры и снижает растекание. Такие подпятники выполняются на нагрузку до 10 т, однако условия устойчивости смазочного слоя у них несовершенны и для восприятия больших нагрузок они не пригодны.

Текстолитовые подпятники, которые обычно работают на воде, имеют также параллельные

плоскости трения, и снижение растекания смазки у них достигается тем, что текстолитовая плоскость трения приобретает ворсистое строение. Ворсинки располагаются в направлении движения, что препятствует перемещению смазки в направлении, перпендикулярном движению, и снижает растекание.

В настоящей статье мы ознакомимся лишь с сегментными самоустанавливающимися подпятниками как наиболее совершенными.

Подпятник этого типа состоит из двух плоскостей трения, погруженных в масло (рис. 15). Одна из этих плоскостей оформлена в виде стального полированного диска или, как его называют, «зеркала», другая, подвижная или неподвижная, плоскость трения разбита на отдельные сегменты, имеющие возможность незначительно менять угол между плоскостью трения сегмента и «зеркалом». Эта некоторая подвижность отдельных сегментов позволяет масляному слою между плоскостями трения приобрести необходимые устойчивые размеры в зависимости от поступления смазки и ее растекания.

Подпятник может нормально работать только при жидкостном трении, при котором плоскости трения не соприкасаются непосредственно друг с другом, поэтому сегменты могут быть изготовлены из любого материала, лишь бы он хорошо обрабатывался, был бы достаточно прочен, и имел бы хорошую теплопроводность.

Имеются большие подпятники, работающие с сегментами из чугуна, но все же обычно плоскость трения сегментов покрывается баббитом главным образом с той целью, чтобы избежать повреждения «зеркала» при полусухом трении, что возможно при неправильной работе подпятника.

Даже при жидкостном трении в подпятнике выделяется значительное количество тепла, которое необходимо отводить. Только в самых малых подпятниках можно отвести тепло за счет охлаждения поверхности ванны подпятника. В более крупных подпятниках требуется принятие специальных мер. Наиболее распространенный спо-

<sup>7</sup> Сегментом называют часть одной из рабочих поверхностей подпятника. Более подробно о конструкции сегментов будет сказано ниже.



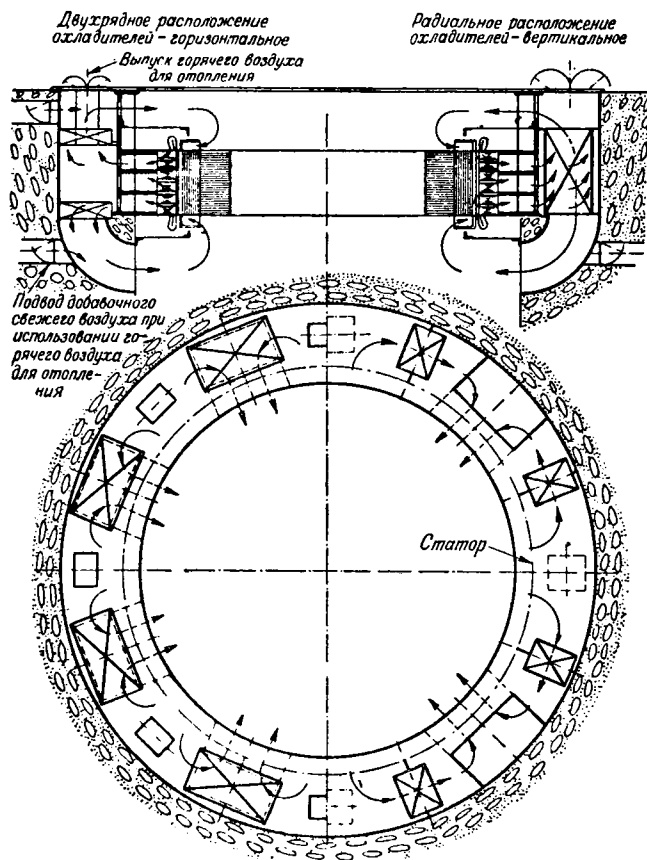


Рис. 16. Схема охлаждения гидрогенератора при замкнутом цикле.

соб отвода тепла — это размещение маслоохладителей в ванне подпятника. Вода при помощи маслоохладителей уносит необходимое количество тепла из масла, в которое погружены трущиеся поверхности. Возможен также отвод тепла с помощью циркуляционной системы охлаждения масла с вынесенными из ванны маслоохладителями. В этом случае циркуляция масла через маслоохладители осуществляется специальными насосами. Эта система смазки в настоящее время почти не применяется ввиду сложности ее устройства и меньшей надежности. Толщина масляного слоя в рабочей части подпятника весьма незначительна и не превышает сотых долей миллиметра, поэтому деформация плоскостей трения от температурных или механических напряжений совершенно недопустима. Это затрудняет создание надежной конструкции, учитывая, что выделение тепла в подпятнике, а также механические нагрузки могут быть весьма значительными.

В эксплуатации гидрогенераторов различают три различных режима работы подпятника: 1) режим пуска и остановки, 2) нормальный режим и 3) работа при угонных скоростях вращения.

Каждый из этих режимов имеет свои особенности, которые должны быть учтены при проектировании и в эксплуатации.

Из всех режимов наиболее легкий — работа при номинальной скорости вращения.

Режим пуска отличается тем, что в момент

трогания коэффициент трения в подпятнике значительно выше, чем при нормальной работе вследствие отсутствия установившегося масляного слоя и наличия полусухого трения, что вызывает необходимость приложения больших моментов вращения. При остановке процесс непрерывного восстановления масляного слоя происходит медленнее и возможен в конце остановки переход на полусухое трение вследствие постепенного выдавливания масляной пленки.

Учитывая эти режимы, усиливают закрепление подпятника от сдвига, стремятся улучшить пару трения рабочих поверхностей подпятника. В особо тяжелых случаях применяют разгрузочные приспособления (например, электромагниты, действующие в период пуска и остановки. В эксплуатации практикуют подъем ротора на торцах для смазывания маслом плоскостей трения. Наиболее тяжелый режим подпятника — это работа при угонной скорости вращения, так как выделение тепла при этом увеличивается, повышается температура плоскостей трения и возрастает опасность их деформации.

Направляющие подшипники для вертикальных валов проектируются и работают на том же принципе, как и подпятники. Еще недавно пытались применять для этой цели цилиндрические подшипники, как для горизонтальных валов. Однако имеется существенное различие в работе горизонтального и вертикального подшипника. У горизонтального подшипника направление приложения нагрузки вполне определенное, и в этом направлении можно предусмотреть несущую поверхность, а остальную часть окружности вкладыша употребить для подвода смазки и охлаждения. В вертикальном направляющем подшипнике предусмотреть направление усилия невозможно. Подшипник должен быть готов воспринять усилие в любом направлении. Для этих условий пригоден сегментный подшипник. Так же как и у подпятника, сегменты подшипника имеют крепление, допускающее незначительную подвижность сегментов с целью самоустановки при работе. Плоскости трения сегментов покрываются антифрикционным сплавом. Для подшипников это является обязательным, так как по условиям расположения подшипник погружен лишь на одну четверть своей высоты в масло и в момент пуска, пока масло не поднимается на всю высоту сегмента, возможно сухое трение верхней части подшипника. Очень часто подшипник работает без водяного охлаждения, так как потери в нем относительно невелики.

Как правило, подшипники работают на самосмазке без применения принудительной циркуляции масла.

**Охлаждение.** Крупные гидрогенераторы выполняются с самовентиляцией по замкнутому циклу.

Типичная схема охлаждения гидрогенератора показана на рис. 16. Как правило, полюсы ротора и прикрепленные с торцов вентиляторы — осевые или центробежные — служат устройством для создания напора воздуха, циркулирующего по замкнутому циклу. Воздух нагнетается в ра-

ные каналы статора, проходит воздухоохладитель и возвращается снова к вентиляторам ротора.

Вследствие тихоходности гидрогенераторов отличаются малой интенсивностью охлаждения и более низким использованием активных материалов.

Стремление сохранить высокий к. п. д. гидрогенераторов исключало необходимость форсирования охлаждения путем применения схем с искусственной вентиляцией с установкой отдельных вентиляторов. К тому же реализация искусственных схем охлаждения для гидрогенераторов представляет значительные трудности вследствие их габаритов генератора и сложности осуществления воздушных уплотнений воздухопроводов.

Исходя из этого, мероприятия конструктора по улучшению охлаждения сводятся в основном к максимальному увеличению окружной скорости ротора и соответствующему снижению нагрузок на увеличение длины машины. Однако при увеличении диаметра и длины активной части гидрогенератора сверх определенных пределов может возникнуть необходимость осуществления дополнительных мероприятий, а именно: 1) осуществление уплотнения охлаждающего воздуха по всей длине машины сквозь радиальные каналы в обод ротора и 2) установка добавочных отдельных вентиляторов в системе охлаждения на воздухоохладителях.

Этим мероприятиям можно дать следующее наименование.

1. Как уже упоминалось, при увеличении длины машины существенно понижается эффективность охлаждения вследствие ограниченности сечения каналов для входа воздуха в машину с торцов ротора, а также и потому, что в середине машины воздух оказывается уже значительно перегретым.

2. Увеличение диаметра ротора при сохранении неизменной окружной скорости приводит к снижению вентилярующей способности ротора. Как известно, в синхронных машинах с явно выраженными полюсами при радиальной системе вентиляции основным источником напора служит ротор, точнее — его полюсная система. Полюсы ротора, закрепленные на ободу, можно рассматривать как вентилятор с радиальными лопатками с торцевым входом воздуха.

Напор центробежного вентилятора зависит от разности квадратов окружных скоростей вентилятора на внешнем и внутреннем его диаметрах. При увеличении диаметра ротора эта разность повышается и напор, создаваемый ротором, уже может обеспечить должного расхода воздуха. Пристроенные к ротору вентиляторы также в известной мере обладают этим свойством, если они полюсного типа.

Недостаточный вход воздуха с торцов ротора исключает возможности любых пристроенных к ротору вентиляторов и применение их не может решить задачи обеспечения необходимого расхода воздуха для охлаждения гидрогенератора. Поэтому при возрастании габаритов гидроге-

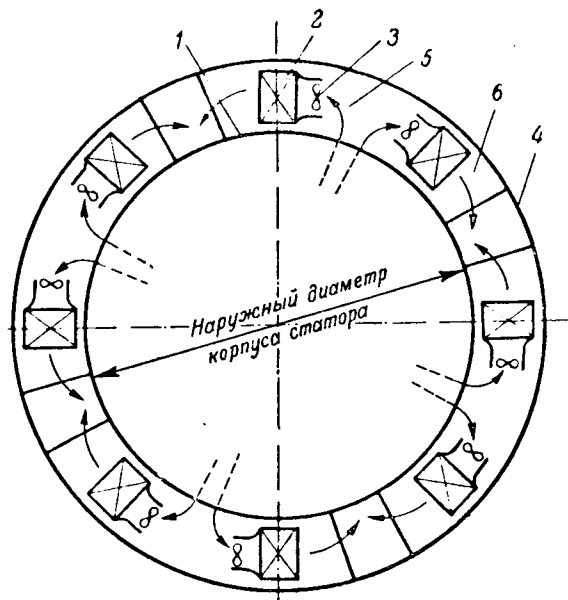


Рис. 17. Схема охлаждения гидрогенератора с добавочными вентиляторами.

1 — статор; 2 — воздухоохладитель; 3 — вентилятор; 4 — вентиляционный кожух машины; 5 — выход горячего воздуха из машины; 6 — выход холодного воздуха из воздухоохладителя в шахты.

нератора как по диаметру, так и по длине необходимо открыть доступ воздуха по всей длине машины через радиальные каналы в ободу ротора.

Это мероприятие обеспечивает: 1) увеличение сечения входных каналов для воздуха, 2) поступление холодного воздуха во всей длине машины, 3) увеличение напора воздуха за счет увеличения разности квадратов окружных скоростей на внутренней и внешней поверхностях ротора.

Однако использование вентилярующего действия каналов в ободу для повышения напора может оказаться недостаточным. Для увеличения напора необходимо в этих случаях иметь последовательно включенное напорное устройство в другой точке воздухопровода.

Таким удобным местом для создания второй напорной камеры могут служить воздухоохладители. Обычно потеря напора в воздухоохладителях составляет примерно 50% напора, необходимого для осуществления циркуляции воздуха в гидрогенераторе. Следовательно, целесообразно преодоление этого сопротивления специальным вентилятором (рис. 17). Попутно с увеличением скоростей воздуха в воздухоохладителях может быть улучшено их использование.

Необходимо все же отметить, что эти мероприятия имеют и недостатки, например: 1) устройство каналов в ободу ротора снижает его прочность; 2) выход воздуха из каналов в ободу требует некоторого увеличения размеров полюса; 3) установка добавочных вентиляторов вызывает дополнительный расход мощности и др. Эти недостатки, однако, обычно не имеют решающего значения.

**Возбуждение и вспомогательные устройства.** В целях достижения максимальной надежности работы системы возбуждения и автоматического



регулирования турбины непосредственно на валу гидрогенератора размещаются: возбудитель, подвозбудитель и регуляторный генератор.

Под генератором на нижней крестовине размещается тормозное устройство. Вместо тихоходного возбудителя на валу гидрогенератора иногда применяется вспомогательный синхронный генератор на валу, от которого питается отдельно стоящий быстроходный возбудительный агрегат. В генераторах, построенных для Щербаковской гидростанции, применен также разгрузочный электромагнит, который подвешен к нижней крестовине.

Возбудители и подвозбудители должны обеспечивать возбуждение генератора при всех его режимах работы. Характеристики возбудителей в связи с этим имеют заданную кратность форсировки напряжения и скорость нарастания напряжения.

Вследствие малой скорости вращения использование модельной мощности возбудителей весьма низкое.

Конструкция возбудителей приспособлена для сопряжения с гидрогенератором и должна обеспечивать свободный доступ к щеточному аппарату. Как правило, возбудители имеют самостоятельную систему вентиляции.

Вследствие большой магнитной инерции тихоходных возбудителей затруднено получение очень высоких скоростей нарастания напряжения и поэтому в настоящее время изыскиваются новые системы возбуждения, в частности исследуются системы с применением ионных преобразователей тока.

Напряжение возбудителей не стандартизовано и ограничивается максимально допустимым его значением с учетом кратности форсировки напряжения с целью уменьшения тока возбуждения ротора. Подвозбудители в качестве источника независимого возбуждения главных возбудителей применяются в тех случаях, когда зона регулирования напряжения параллельной обмотки главного возбудителя в схеме самовозбуждения не обеспечивает устойчивую характеристику во всех режимах работы.

Регуляторные генераторы служат для питания привода маятникового регулятора турбины и представляют собой синхронный генератор с постоянными магнитами. Постоянные магниты применяются с целью повышения надежности работы и упрощения схемы возбуждения регуляторного генератора.

Вследствие относительно малого воздушного зазора регуляторные генераторы, как правило, выполняются в виде отдельной машины на подшипниках качения, соединенной с валом гидрогенератора при помощи эластичной муфты. Тормозное устройство служит для торможения при остановке генератора с целью сократить время выбега, которое для мощных тихоходных гидрогенераторов весьма велико. Торможение осуществляется подачей сжатого воздуха в систему тормозных цилиндров. Тормозные колодки прижи-

маются к тормозным дискам, укрепленным в роторе генератора. Обычно тормоза используются также и для подъема ротора на небольшую высоту (в пределах 10—20 мм), который бывает необходим при ревизии подпятника или после тщательной стоянки генератора, для смазывания щихся поверхностей маслом. Подъем ротора осуществляется подачей масла в систему тормозных цилиндров при помощи насоса высокого давления.

**Заключение.** Приведенный выше краткий обзор особенностей конструкций мощных гидрогенераторов позволяет сделать следующие выводы относительно синхронных машин этого класса.

1. Параметры и конструкция гидрогенераторов тесно связаны с характером гидроэнергетического сооружения. Поэтому при проектировании гидрогенераторов осуществляется тесный контакт между проектировщиками станции, турбины и генератора.

2. Вследствие большого количества накладываемых на гидрогенератор при его проектировании, затрудняется унификация типов и построение серий крупных гидрогенераторов. Однако возможно осуществить унификацию основных узлов гидрогенераторов на основе разработки наиболее целесообразной типовой конструкции.

3. Выбор габаритов гидрогенераторов определяется как экономикой самой машины, так и стоимостью строительных сооружений.

4. При прочих равных условиях предпочтение должно быть отдано подвесному типу конструкции гидрогенератора, как наиболее надежному в механическом отношении.

5. Осевая нагрузка на подпятники крупных гидрогенераторов достигает 2000 т и более. В связи с чем конструкция и технология изготовления таких подпятников требуют особо тщательной проработки на основе изучения работы подпятников в эксплуатации и на моделях.

6. Снижение угонной скорости вращения гидрогенераторов весьма целесообразно с точки зрения выбора оптимальных соотношений

повышающих использование материалов в гидрогенераторе.

7. Охлаждение крупных тихоходных гидрогенераторов требует дальнейшего совершенствования с целью повышения интенсивности охлаждения и его равномерности по длине машины.

8. Система возбуждения гидрогенераторов с применением электромагнитных возбудителей ограничивает возможности повышения скорости нарастания и потолка напряжения. Целесообразно изыскание новых систем возбуждения с применением ионных преобразователей.

#### Литература

1. Б. С. Успенский. Гидроэлектрические станции большой мощности. Электричество, № 1 и 2, 1952.
2. Г. Н. Петров. Геометрия электрических машин переменного тока. Электричество, № 3, 1944.

# Трансформатор для емкостного отбора мощности от высоковольтных линий электропередачи

Доцент В. Ю. ГЕССЕН, инж. В. В. ИВАШЕВ, инж. В. Г. КОЖЕМЯКИН,  
инж. Л. Д. НАУМОВСКИЙ

Ленинградский филиал ВИАХ, ЛВС Ленэнерго

Расчетная схема установки емкостного отбора мощности от линий электропередачи для общего случая представлена на рис. 1, где эквивалентная емкость:

$$C_s = C_1 + C_2. \quad (1)$$

Эквивалентное напряжение (при нагрузке, равной нулю)

$$U_s = U_\phi \frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad (2)$$

где  $U_\phi$  — фазное напряжение линии.

Как известно, для емкостного отбора используется изолированный грозозащитный трос, специальная антенна или включение сосредоточенных емкостей. В выражении (1) для троса (антенны):

$$C_1 = C'_1 l_a, \quad (3)$$

$$C_2 = C'_2 l_a, \quad (4)$$

где  $C'_1$  — эквивалентная емкость между системой фазных проводов и антенной (на 1 км);

$C'_2$  — емкость антенны относительно земли (на 1 км);

$l_a$  — длина антенны, км.

$C'_1$  и  $C'_2$  определяются в результате решения систем уравнений Максвелла.

Для трехфазной линии эквивалентное напряжение схемы при нагрузке, равной нулю, т. е. напряжение троса или антенны

$$U_s = U_{\phi 1} \frac{C'_1}{C'_1 + C'_2} \times \frac{C_{14} - \frac{1}{2}(C_{24} + C_{34}) - j \frac{\sqrt{3}}{2}(C_{24} - C_{34})}{C_{14} + C_{24} + C_{34}}, \quad (5)$$

где  $U_{\phi 1}$  — фазное напряжение первой фазы линии;

$C_{24}$ ,  $C_{34}$  — частичные емкости (на 1 км) между фазными проводами линии 1, 2, 3 и антенной 4.

Кратко излагается теория емкостного отбора электроэнергии от линии электропередачи высокого напряжения, в частности, путем использования грозозащитного троса. Формулируются требования к понижающему трансформатору и дается описание принципа действия и конструкции специального трансформатора для этой цели. Приводятся опытные данные по применению специального трансформатора в высоковольтной сети Ленэнерго и намечаются дальнейшие пути развития работы.

Авторами настоящей статьи В. В. Ивашевым и В. Г. Кожемякиным для установок емкостного отбора предложен специальный трансформатор<sup>1</sup> с постоянной реактивностью, совмещающий в себе понижающий трансформатор

с автопеременным коэффициентом трансформации по напряжению и реактор. Подобно обычному трансформатору специальный трансформатор с известными приближениями может быть представлен в схеме отбора Т-образной эквивалентной схемой (рис. 2) с параметрами, приведенными к первичной обмотке.

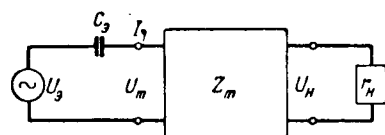


Рис. 1. Эквивалентная расчетная схема емкостного отбора мощности.

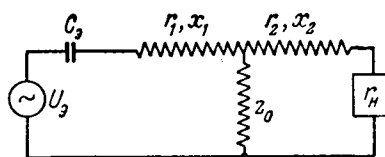


Рис. 2. Расчетная схема емкостного отбора мощности со специальным трансформатором, представленном в виде Т-образной эквивалентной схемы замещения.

Зависимости, характеризующие работу схемы, могут быть определены сравнительно просто. Основные из этих зависимостей приведены в табл. 1. В уравнениях (6) ... (10)  $Z_m$  представляет собой полное сопротивление трансформатора с учетом сопротивления нагрузки потребителя  $r_n$ .

$$Z_m = r_1 + ar_2 + ar_n + j(x_1 + ax_2), \quad (11)$$

где

$$a = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2 + r_n} \quad (12)$$

— коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания;  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $r_n$  — параметры, пока-

<sup>1</sup> Приоритет от 11 октября 1948 г. № 385839—III.

	при $x_m \neq x_c$	при $x_m = x_c$	при $\frac{r_1 + a_1 r_2}{a_1 r_n} = 1$
Напряжение трансформатора (антенны)	$U_m = U_s \frac{Z_m}{Z_m - j \frac{1}{\omega C_s}} \quad (6)$	$U_m = U_s \frac{Z_1 + aZ_2 + ar_n}{r_1 + ar_2 + ar_n} \quad (6a)$	$U_m = U_s \left[ 1 + j \frac{x_m}{a_1 r_n (1 + t)} \right]$
Ток первичной обмотки трансформатора	$I_1 = U_s \frac{1}{Z_m - j \frac{1}{\omega C_s}} \quad (7)$	$I_1 = U_s \frac{1}{r_1 + ar_2 + ar_n} \quad (7a)$	$I_1 = U_s \frac{1}{a_1 r_n (1 + t)}$
Ток нагрузки потребителя	$I_n = U_s \frac{a}{Z_m - j \frac{1}{\omega C_s}} \quad (8)$	$I_n = U_s \frac{a}{r_1 + ar_2 + ar_n} \quad (8a)$	$I_n = U_s \frac{1}{r_n (1 + t)}$
Напряжение на зажимах потребителя	$U_n = U_s \frac{ar_n}{Z_m - j \frac{1}{\omega C_s}} \quad (9)$	$U_n = U_s \frac{ar_n}{r_1 + ar_2 + ar_n} \quad (9a)$	$U_n = U_s \frac{1}{1 + t}$
Мощность потребителя	$P_n = U_s^2 \frac{a^2 r_n}{\left( Z_m - j \frac{1}{\omega C_s} \right)^2} \quad (10)$	$P_n = U_s^2 \frac{a^2 r_n}{(r_1 + ar_2 + ar_n)^2} \quad (10a)$	$P_n = U_s^2 \frac{1}{r_n (1 + t)^2} \quad (11)$

занные на схеме (рис. 2). Коэффициент  $a$ , как следует из выражения (12), — величина комплексная;

$$a = a_1 + ja_2. \quad (13)$$

Его вещественная составляющая при сколь угодно значительном токе нагрузки преобладает над мнимой. Поэтому при токе нагрузки от 0,1 до номинальной мнимой составляющей можно пренебречь. Тогда выражение (11) упростится.

С учетом этого упрощения, но с достаточной для практических расчетов точностью анализ схемы может быть проведен с помощью уравнений (66)...(106) табл. 1. Коэффициент  $t$ , как легко показать, учитывает изменение напряжения у потребителя.

Из уравнения (10) видно, что отбираемая мощность будет иметь максимальное значение при резонансе, т. е. при равенстве индуктивного сопротивления трансформатора  $x_m$  и емкостного сопротивления схемы  $x_c$ :

$$x_c = \frac{1}{\omega C_s} = x_1 + ax_2 = x_m. \quad (14)$$

Емкостное сопротивление  $x_c$  — величина постоянная, независимая от изменения нагрузки потребителя. Следовательно, для выполнения условия (14) величина  $x_m$  также должна быть постоянной и независимой от нагрузки потребителя.

При резонансе или достаточно близком к нему режиме напряжение эквивалентной емкости схемы будет возрастать по мере роста нагрузки потребителя. Следовательно, если принять во внимание выражение (66), напряжение на первичной стороне трансформатора может возрасти с увеличением нагрузки потребителя в несколько раз. Это создает для трансформатора в схеме емкост-

ного отбора условия работы, существенно отличающиеся от условий обычного трансформатора.

Практически первичное напряжение трансформатора приходится ограничивать главным образом в связи с затруднениями, возникающими при осуществлении постоянства величины  $x_m$  и поддержании постоянства напряжения у потребителя  $a$  также из условий изоляции антенны <sup>2</sup> и самого трансформатора.

Отношение  $\frac{U_m}{U_s}$  характеризует так называемую „кратность“ роста напряжения на емкости и сосредоточенной антенне). Пользуясь уравнением (66), ее можно представить в виде:

$$k = \frac{U_m}{U_s} = 1 + j \frac{x_m}{ar_n} \frac{1}{1 + t}. \quad (15)$$

При антенном отборе

$$k = 1 + j \frac{P_n (1 + t)}{\omega (C'_1 + C'_2) I_a U_s^2 t}. \quad (16)$$

Задаваясь кратностью  $k$ , изменением напряжения у потребителя  $1 + t$ , нагрузкой потребителя  $P_n$  и параметрами антенны  $U_s$ ,  $(C'_1 + C'_2)$ , можно определить необходимую длину антенны:

$$l_a = \frac{P_n (1 + t)}{a \omega (C'_1 + C'_2) U_s^2 \sqrt{k^2 - 1}}. \quad (17)$$

На рис. 3 приведены кривые зависимости длины антенны (с обычным для грозозащитного троса сопротивлением  $x_c \approx 290 \text{ ком/км}$ )

<sup>2</sup> При использовании грозозащитного троса допустимая изоляция последнего определяется условиями грозозащиты линии.

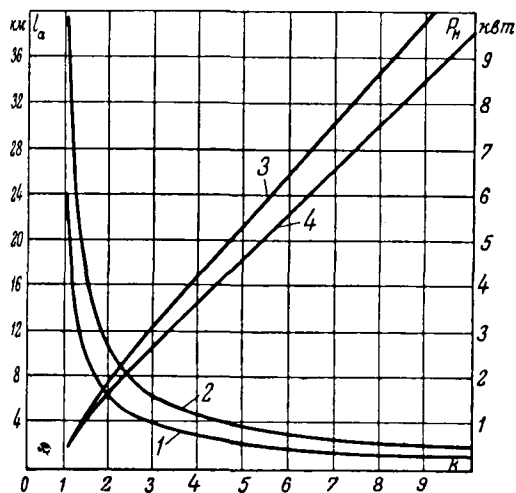


рис. 3. Зависимость длины антенны  $l_a$  и мощности нагрузки  $P_n$  от кратности роста напряжения  $k$ .

1 —  $l_a = f(k)$  при  $P_n = 3 \text{ кВт}$  и  $\Delta U = \pm 10\%$ ; 2 —  $P_n = f(k)$  при  $P_n = 3 \text{ кВт}$  и  $\Delta U = \pm 10\%$ ; 3 —  $P_n = f(k)$  при  $l_a = 3,5 \text{ км}$  и  $\Delta U = \pm 5\%$ ; 4 —  $P_n = f(k)$  при  $l_a = 3,5 \text{ км}$  и  $\Delta U = \pm 10\%$ .

кратности роста напряжения  $k$  при мощности нагрузки 3 и 5 кВт и относительных колебаниях напряжения  $\Delta U = \pm 10\%$ . На основании этих данных можно заключить, что в отношении длины антенны наиболее выгодные значения кратности для этих величин мощности нагрузки лежат в пределах  $k = 3 \dots 3,5$ .

В результате преобразования уравнения (17) можно получить выражение для мощности нагрузки:

$$P_n = \frac{U_s^2 \eta_a (C_1' + C_2') \omega V k^2}{1 + t} \quad (18)$$

рис. 3 показана также зависимость отбираемой мощности  $P_n$  от кратности  $k$  при относительном колебании напряжения у потребителя  $\pm 10\%$  и длине антенны 3,5 км (анкерный участок изолированного троса).

Изложенное позволяет кратко сформулировать основные требования к трансформатору, который должен: 1) иметь постоянное и численное значение  $x_m$  в выбранном диапазоне нагрузки или диапазоне кратности роста напряжения; 2) поддерживать постоянным (в предельно допустимом изменении) напряжение у потребителя, т. е. иметь автопеременный, зависящий от нагрузки и кратности  $k$  коэффициент трансформации по напряжению; 3) иметь минимально возможную величину активной составляющей сопротивления, так как изменение напряжения у потребителя при резонансе будет зависеть главным образом от отношения активного сопротивления трансформатора к сопротивлению нагрузки.

Обычный стандартный трансформатор не удовлетворяет перечисленным требованиям, его можно использовать в схеме емкостного отбора лишь в условии применения дополнительного индуктивного сопротивления, которое включается или последовательно с первичной обмоткой, или по-

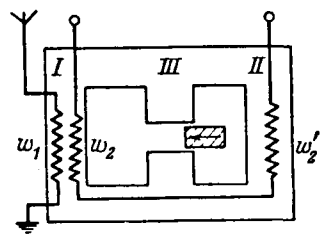


рис. 4. Эскиз опытного образца специального трансформатора для емкостного отбора мощности от высоковольтных линий электропередачи.

следовательно с первичной и вторичной обмотками, или последовательно со вторичной обмоткой.

Первый и второй способы включения обеспечивают при известных условиях требуемое соотношение между  $x_m$  и  $x_c$ , но осуществление дополнительной индуктивности вызывает конструктивные трудности, так как она, будучи включенной в цепь первичной обмотки, имеющей напряжение 10...35 кВ (при кратности  $k = 3,5$ ), при соответствующем уровне изоляции должна обладать возможно меньшей величиной активной составляющей сопротивления. Это влечет за собой чрезмерное увеличение ее габаритов. При третьем и в меньшей степени втором способах, вследствие значительного увеличения намагничивающего тока ограничивается рост первичного напряжения и при данных условиях существенно уменьшается предельная величина отбираемой мощности.

Попытка построить дополнительную индуктивность, удовлетворяющую сформулированным выше условиям, привела к мысли о создании аппарата, совмещающего в себе и трансформатор, и дополнительную индуктивность. Опытный образец такого аппарата был создан и исследован в реальных условиях на линии электропередачи.

Как видно из рис. 4, средний стержень III трехстержневой магнитной системы этого специального трансформатора разрезан и снабжен регулируемым магнитным шунтом. Крайний стержень I полного сечения несет первичную обмотку  $w_1$ , и часть вторичной обмотки  $w_2$ . Крайний стержень II половинного сечения несет остальную часть вторичной обмотки  $w_2'$ , включенную последовательно с первой частью  $w_2$ .

При возрастании напряжения первичной обмотки индукция в стержне I изменяется в пределах прямолинейной части кривой намагничивания до ее перегиба, а индукция в стержне II в пределах прямолинейной части кривой после перегиба. Ввиду значительной величины рассеяния обмотки  $w_2'$  создается необходимое индуктивное сопротивление. Напряжение части  $w_2$  вторичной обмотки растет пропорционально напряжению обмотки  $w_1$ , а напряжение части  $w_2'$  падает вследствие перераспределения магнитного потока между стержнями II и III с помощью маг-

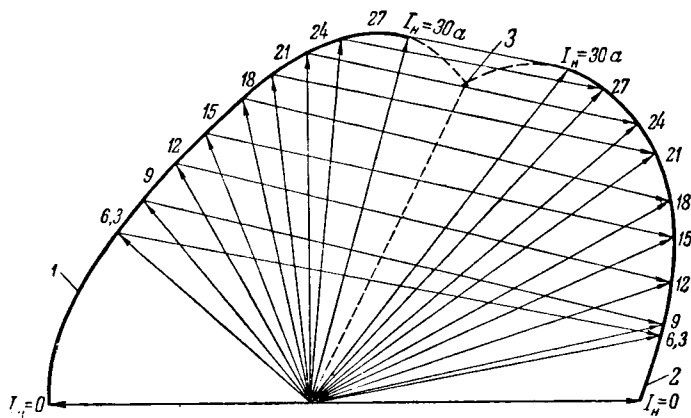


Рис. 5. Диаграмма изменения векторов напряжения обеих частей вторичной обмотки ( $w_2$  и  $w_2'$ ) трансформатора в зависимости от тока нагрузки  $I_n$ .

1 — геометрическое место концов вектора напряжения  $\dot{U}_2$  (часть вторичной обмотки  $w_2$ ); 2 — геометрическое место концов вектора  $\dot{U}_2'$  (часть вторичной обмотки  $w_2'$ ); 3 — точка короткого замыкания. Вектор напряжения нагрузки  $\dot{U}_n = \dot{U}_2 - \dot{U}_2'$ .

нитного шунта. В итоге результирующее напряжение вторичной обмотки, а следовательно, и напряжение на зажимах нагрузки поддерживаются постоянными. Напряжение на обмотке  $w_1$  растет без заметного увеличения тока намагничивания.

Исследование опытного образца специального трансформатора на двухцепной линии 110 кВ при  $x_c = 80$  ком,  $U_s = 10,4$  кВ и максимальной нагрузке около 2 кВт показало следующее:

1. В режиме, близком к резонансу, первичное напряжение возросло лишь до величины  $k \approx 2,6 \dots 2,7$ . Следовательно диапазон изменения нагрузки оказался меньшим, чем предполагалось. Вторичное напряжение при этом было недостаточно постоянным. Такой результат объясняется главным образом, повидимому, тем, что индуктивное сопротивление трансформатора было больше данного сопротивления  $x_c$ .

2. Активная составляющая сопротивления трансформатора  $r_m$  оказалась выше предполагаемой вследствие потерь от потоков рассеяния вторичной обмотки в баке, конструкциях и воздушном зазоре шунта, а также вследствие большой величины индукции в стержне II.

3. Угол между векторами напряжения части вторичной обмотки  $w_2$  и части  $w_2'$  изменялся от  $180^\circ$  при холостом ходе до  $0^\circ$  при коротком замыкании (рис. 5).

4. Режим работы части вторичной обмотки  $w_2'$  был таков, что при некоторых условиях наступал феррорезонанс и связанное с ним резкое повышение напряжения у потребителя. На первичной стороне трансформатора напряжение при этом возрастало до 60 ... 70 кВ, а ток достигал 1 а.

Первые результаты испытаний привели к необходимости дополнительно исследовать зависимость сопротивления трансформатора  $x_m$  от тока нагрузки. Опытным путем в лабораторных условиях был получен ряд таких зависимостей, наиболее характерные из которых приведены на рис. 6. Кривая 1 относится к специальному трансформатору,

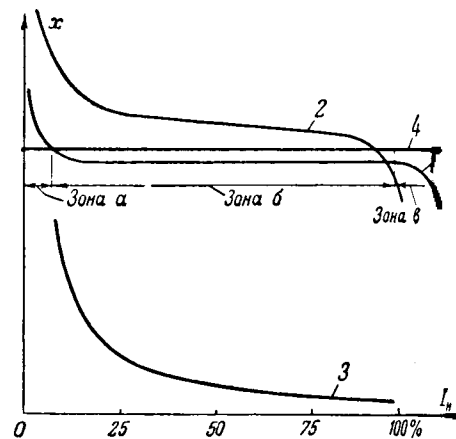


Рис. 6. Зависимость емкостного сопротивления  $x_c$  и сопротивления трансформатора  $x_m$  от тока нагрузки  $I_n$ .

1 и 2 —  $x_m = f(I_n)$  для двух разных моделей специального трансформатора; 3 —  $x_m = f(I_n)$  для стандартного трансформатора; 4 —  $x_c = f(I_n)$ .

тору, сопротивление  $x_m$  которого отличается большим постоянством. Вторичное напряжение этого трансформатора при больших токах нагрузки и при одинаковых значениях  $r_m$  изменяется меньше, чем вторичное напряжение специального трансформатора, к которому относится кривая 2. Кривая 3 построена для обычного, стандартного трансформатора.

Кривая 1 (рис. 6) имеет три характерные зоны. Зона а, в которой  $x_m \approx z_0 \gg x_c$  ( $z_0$  — сопротивление холостого хода), расположена в начале кривой и соответствует режиму, при котором схема далека от резонанса. В этой зоне напряжение быстро уменьшается, ток в цепи мал,  $U_m \approx U_s$ .

По мере роста тока и рассеяния вторичной обмотки сопротивление трансформатора  $x_m$  стабилизируется и приближается к емкостному сопротивлению  $x_c$ . Этому режиму, близкому к резонансу, соответствует зона б кривой 1 (рис. 6). По мере роста тока  $I_n$  напряжение  $U_m$  растет по закону  $U_m = kU_s$ .

Наконец, после того как ток нагрузки становится больше некоторого выбранного значения, сопротивление  $x_m$  вновь начинает изменяться. Для этого режима, которому соответствует зона в кривой 1 (рис. 6), характерно соотношение сопротивлений:  $x_m \approx x_1 + ax_2 < x_c$ . По мере приближения к режиму короткого замыкания разрыв между величинами  $x_m$  и  $x_c$  возрастает и при коротком замыкании  $x_m \ll x_c$ . Вследствие этого тока падение напряжения в емкости сильно возрастает и не компенсируется падением напряжения в трансформаторе, поэтому  $U_m < U_s$ .

В результате исследований в лаборатории в реальных условиях установлено, что равенство  $x_m = x_c$  наступает при малых значениях нагрузки, когда  $k \approx 1$  (кривая 1 рис. 6), и если зона б кривой  $x_m = f(I_n)$  проходит несколько ниже кривой 4, то установка работает устойчиво во всем диапазоне нагрузок. Если же равенство

$x_c$  наступает при больших величинах на-  
пряжения (кривая 2), когда  $k > 1$  и индукция в сер-  
дке возрастает, то трансформатор переходит  
в режим феррорезонанса, который характеризуется  
опасным повышением напряжения.  
Таким образом, в дополнение к сформулиро-  
ванным выше требованиям необходимо, чтобы  
пересечения кривых  $x_m = f(I_n)$  и  $x_c = f(I_n)$   
происходила в зоне самой минимальной нагрузки,  
чтобы зона  $a$  кривой  $x_m = f(I_n)$  имела воз-  
можность более крутой спад, а прямолинейная  
зона  $b$  располагалась возможно ближе  
к кривой  $x_c = f(I_n)$ , но ниже ее. Только при  
исполнении этого требования исключается воз-  
можность феррорезонанса.

Вспомогательным попутно, что при коротком замыкании  
напряжения во вторичной обмотке трансформатора  
не превосходит 1,6...1,8 номинального  
напряжения, требуется защита трансформатора от сверх-  
тока. Это объясняется тем, что уста-  
новившись из резонанса (зона  $b$  кривой 1,  
6) и напряжение трансформатора и антенны  
растет.

Изучение зависимости сопротивления  
трансформатора от тока нагрузки, помимо выяс-  
нения физической стороны явлений, позволило  
прийти к осуществлению тех требований  
трансформатору, которые были изложены выше.  
Приближение достигнуто путем перевода  
всех участков магнитопровода в область  
высоких индукций, а также путем изменения  
соотношения между сечениями стержней и чис-  
лом витков обмоток. Кроме того, были установ-  
лены конструктивные закономерности и выработаны  
методы расчета основных элементов трансфор-  
матора.

Данные одной из последних конструкций  
трансформатора (рис. 7) и данные первоначаль-  
ной конструкции (рис. 4) приведены в табл. 2.  
Принцип действия трансформатора (рис. 7)  
можно упростить можно представить себе  
следующим образом. По мере роста нагрузки  
магнитный поток, создаваемый в стержне I током  
первичной обмотки, растет по закону  $\Phi_1 = k\Phi_0$   
напряжения в первичной обмотке пре-  
делно. По этому же закону возрастает и  
напряжение  $E_2$ , которая наводится во вторичной об-

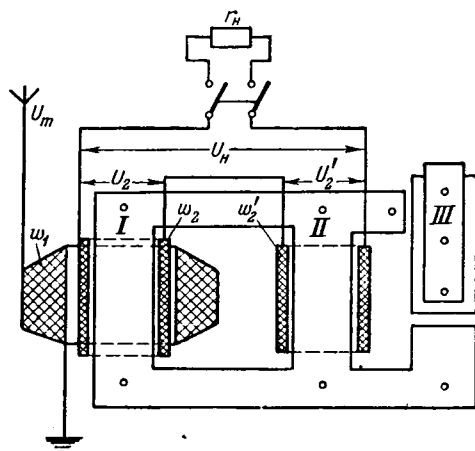


Рис. 7. Специальный трансформатор для емкостного отбора мощности более современной конструкции.

мотке  $w_2$ , расположенной на стержне I. Элек-  
тродвижущая сила  $E'_2$  обмотки  $w'_2$ , распо-  
ложенной на стержне II, непрерывно уменьшается,  
так как ток нагрузки, протекая по обмотке  $w'_2$ ,  
создает поток, направленный против главного  
потока  $\Phi_1$  и заставляющий его замыкаться через  
магнитный шунт (стержень III с воздушным  
зазором). При определенной нагрузке э. д. с.  
 $E'_2$  целиком расходуется на падение напряжения  
в обмотке  $w'_2$  и напряжение этой обмотки  $U'_2$   
равно нулю. С дальнейшим увеличением тока  
нагрузки меняет свое направление суммарный  
магнитный поток в стержне II, а напряжение  $U'_2$   
меняет свой знак по сравнению с тем знаком,  
который оно имело при холостом ходе.

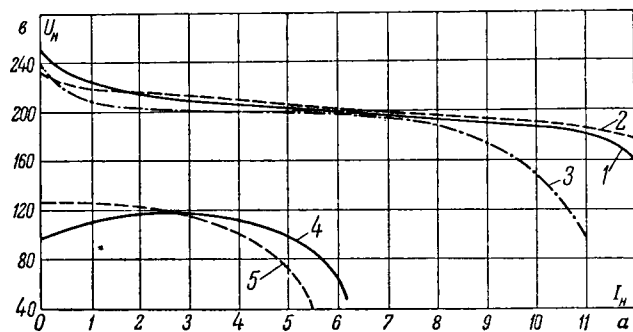
Соответствующим выбором числа витков  $w_2$   
и  $w'_2$  удастся стабилизировать напряжение на  
зажимах потребителя  $U_n = U_2 + U'_2$  в необходи-  
мых пределах. Вследствие большого рассеяния  
обмотки  $w'_2$ , т. е. большой величины  $x'_2$ , реак-  
тивное сопротивление  $x_m \approx x_1 + ax_2$  при изменении  
тока нагрузки практически остается постоянным.

Таким образом, основной поток  $\Phi_1$ , создавае-  
мый током первичной обмотки  $w_1$  в стержне I,  
при определенных нагрузках замыкается через  
стержень II и наводит в обмотке  $w'_2$  э. д. с.

Расчетные данные опытных образцов специального трансформатора

Таблица 2

	Сечение стали, см <sup>2</sup>				Индукция в стержнях, кгс				Вес магнитопровода, кг	Потери холостого хода, вт		Намагничивающая мощность, ват		Число витков			Потери в меди, вт
	стержней			Ярма	k=1		k=3			k=1	k=3	k=1	k=3	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w' <sub>2</sub>	
	I	II	III		I	II	I	II									
ый обра- (рис. 4) .	52	52	28,5	60,5	6,75	14	20	Более 20	67,0	64	330	330	Более 2 000	12 500	150 175 200 225	140 170 200 250	99,0
ый обра- (рис. 7) .	67	67	67	67	4,57	4,57	16	16	63,0	12	210	65	2 150	16 200	120 180	180 240 300 360	136,0

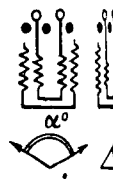
Рис. 8. Опытные кривые  $U_n = f(I_n)$ .

1 и 2 — для трансформатора, представленного на рис. 7; 3 — для трансформатора, представленного на рис. 4; 4 — для двух трансформаторов НОМ-6, один из которых включен реактором; 5 — для трансформатора НОМ-6.

(трансформаторный режим). Затем, будучи вытеснен из стержня II потоком, созданным током нагрузки, он замыкается через стержень III с шунтом, в котором ток обмотки  $w_2$  создает, кроме того, поток  $\Phi_{II}$  (реакторный режим). При полной нагрузке магнитный поток стержня III  $\Phi_{III}$  складывается из потока  $\Phi_I$  и потока  $\Phi_{II}$ . На рис. 8 приведены опытные кривые  $U_n = f(I_n)$  для трансформаторов, представленных на рис. 7 и 4, и нормального НОМ-6. Как можно видеть из сравнения этих кривых, мощность отбираемая первым трансформатором (рис. 7), несмотря на наличие у него некоторых недостатков, выявленных при испытании, очень близко подходит к предельной, обеспечиваемой параметрами антенны.

Опытная проверка трансформатора, представленного на рис. 7, производилась на одноцепных линиях 110 и 220 кВ с горизонтальным расположением проводов и на двухцепной линии 110 кВ с расположением проводов «обратной елкой». В том и другом случае грозозащитный трос использовался в качестве антенны следующим образом: а) изолировались и использовались два троса; б) изолировался и использовался один трос, второй отсутствовал; в) изолировался и использовался один трос, второй оставался зазем-

Рис. 9. Схемы присоединения трансформаторов к изолированным тросам одноцепной линии с горизонтальным расположением проводов и соответствующие этим схемам диаграммы векторов вторичного напряжения каждого из трансформаторов при холостом ходе.



ленным; г) изолировался и использовался трос, второй изолировался, но не использовался. Результаты опытной проверки (напряжения, емкостные сопротивления, мощность, идущая на 1 км антенны при  $k=3,5$ ) приведены в таблице (см. приложение). В таблице приведена также эффективность схемы (считаемая отбираемая мощность) в процентах. При определении эффективности схемы мощность отбираемая при использовании двух тросов принята за 100%.

На рис. 9 изображены схемы присоединения трансформаторов к изолированным тросам одноцепной линии с горизонтальным расположением проводов и соответствующими этим схемам диаграммами векторов вторичного напряжения каждого из трансформаторов при холостом ходе. Видно из рисунка, при таком присоединении трансформаторов и соответствующем соединении их обмоток низкого напряжения может быть получена несимметричная трехфазная система (ненормальная звезда или открытый треугольник).

При присоединении к такой системе нормальных трехфазных короткозамкнутых двигателей, вызывает, что нагруженный и ненагруженный двигатель после трогания с места набирает нормальную скорость вращения и при перемене чередования фаз меняет направление вращения, т. е. ведет себя так же, как и при питании от обычной трехфазной сети. Следовательно, от установочной емкостной отбора возможно питать не только осветительную, но и силовую нагрузку. Благодаря этому, есть основание считать возможной параллельную работу малой электростанции или системы малых электростанций с мощной системой через установки такого рода.

(13.11.1954)

#### Приложение. Результаты опытной проверки трансформатора, представленного на рис. 7

Использование тросов в качестве антенны	Одноцепные линии электропередачи с горизонтальным расположением проводов								Двухцепная линия 110 кВ с расположением проводов «обратной елкой»			
	110 кВ	220 кВ	110 кВ	220 кВ	110 кВ	220 кВ	110 кВ	220 кВ	$U_m$ , кВ	$x_C$ , ком/км	$P_n$ , кВт/км	Эффективность, %
	$U_m$ , кВ		$x_C$ , ком/км		$P_n$ , Вт/км		Эффективность, %					
Изолированы и использованы оба троса . . . . .	3,73	10,5	391	447	204,6	1 426	100	100	10,4	281	1 103	100
Изолирован и использован один трос (второго нет) . . . . .	4,15	10,3	472	468	105	647	51,4	45,4	10,5	562	572	51,4
Изолирован и использован один трос (второй заземлен) . . . . .	4,43	11,6	453	501	124,5	775	60,9	54,3	8,7	463	467	42,3
Изолирован и использован один трос (второй изолирован, но не использован) . . . . .	3,9	10,5	464	507	94,5	627	46,3	44,0	10,8	478	703	63

# Регулирование скорости нарастания обратного напряжения в цепях с ионными вентилями

Кандидат техн. наук, доц. М. М. АКОДИС

Уральский политехнический институт им. Кирова

Вероятность возникновения обратных зажигания в мощных ионных вентилей сильно зависит скорости нарастания обратного напряжения на вентиле после окончания коммутации. Как выяснилось [Л. 1], скорость нарастания обрат-

ного напряжения на вентиле определяется индуктивностью цепи коммутации и емкостями, шунтирующими элементы выпрямительной установки. Наличием этих емкостей, либо индуктивности цепи коммутации, можно снизить скорости нарастания обратного напряжения, облегчив гашение тока, и тем самым уменьшить вероятность возникновения обратных зажиганий.

Включение емкости приводит к увеличению электрических потерь в выпрямительной установке. В некоторых схемах — создает угрозу перегрева вентилей [Л. 2], поэтому значительное снижение скорости восстановления напряжения путем увеличения емкости установки не всегда возможно. Более эффективного снижения скорости восстановления напряжения можно достигнуть путем увеличения индуктивности цепи, что, помимо снижения скорости восстановления напряжения, также ограничивает скорость нарастания обратного напряжения, подводимой к дуге в этот период.

При большой индуктивности цепи можно не только затруднить образование разряда при возникновении обратного напряжения, но и подавить возникший разряд [Л. 2, 3]. Если после импульсного разряда шунтирующей емкости на протяжении промежутка, лимитируемый индуктивностью, подвод энергии от источников будет недоустроен для поддержания и развития силовой дуги, разряд будет подавлен.

Увеличение индуктивности рассеяния трансформатора или включение в анодные цепи дополнительных реакторов с линейными характеристиками может обеспечить лишь ограниченное увеличение индуктивности цепи восстанавливающего напряжения. С увеличением индуктивности цепи угол коммутации, увеличивается «скачок» обратного напряжения, понижается выпрямленное напряжение, ухудшается коэффициент мощности выпрямительной установки. Более высокий эффект можно дать включение в анодные цепи индуктивности с сильно насыщающимися сердечниками

*Показано, что с помощью насыщающихся реакторов в цепях с ионными вентилями можно обеспечить весьма значительное снижение скорости нарастания обратного напряжения на вентиле, и тем самым значительно повысить его мощность и устойчивость против обратных зажиганий. В приложениях даны методы расчета скорости нарастания обратного напряжения и выбора параметров реактора и величины емкости, необходимых для обеспечения определенного времени нарастания обратного напряжения.*

из ферромагнитных материалов (холоднокатаная сталь, железо-никелевые сплавы). Соответствующим выбором параметров в таком реакторе можно обеспечить достаточно малую индуктивность при нарастании и протекании прямого тока.

При протекании обратного тока, определяющего восстановление напряжения, сердечник начинает перемагничиваться, обеспечивая значительное увеличение индуктивности. Скорость увеличения индуктивности зависит от крутизны перелома кривой намагничивания и петли гистерезиса, характерных для материала сердечника.

Вихревые токи, возникающие в сердечнике при изменении потока, будут препятствовать его перемагничиванию, уменьшая крутизну и смещая точку перегиба кривой намагничивания. Вследствие смещения вправо (рис. 1,а) точки перегиба кривой намагничивания, обусловленного гистерезисом и вихревыми токами в сердечнике, индуктивность после изменения направления тока не сразу увеличивается и обратный ток сначала нарастает с большой скоростью. При слишком малых емкостях зарядный ток в период восстановления напряжения может не превысить значения тока, при котором происходит перегиб кривой намагничивания, следовательно, индуктивность цепи не возрастает.

Если не требуются значительные углы регулирования и работа при больших колебаниях нагрузки, так что скачок обратного напряжения мало колеблется, тогда с помощью насыщающихся реакторов можно получить почти апериодическое восстановление напряжения без включения демпфирующих сопротивлений. Для этого необходимо включить такую емкость, при которой обратный ток незначительно превышает ток насыщения сердечника. Нарастание тока обратного направления через реактор продолжается до тех пор, пока напряжение на емкости не станет равным мгновенному значению напряжения трансформатора. Пока обратный ток, протекающий через реактор, нарастает, изменение магнитного потока происходит по крутой ветви характеристики намагничивания (рис. 1,а,б). Следовательно, индуктивность цепи очень велика. Когда ток, достигнув максимального значения, начнет уменьшаться,



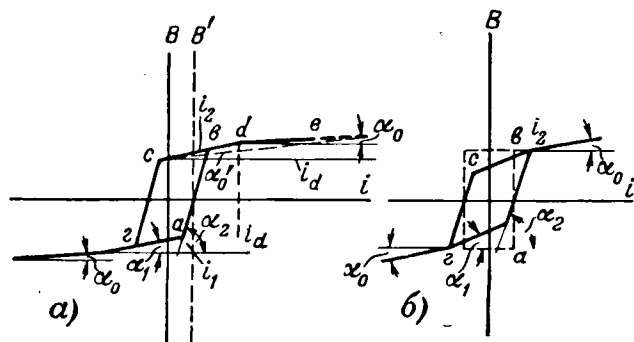


Рис. 1.

создавая э. д. с. самоиндукции, поддерживающую ток вопреки противодействию все возрастающего напряжения конденсатора, изменение потока происходит по пологой части гистерезисной петли  $bc$  (рис. 1, а), имеющей очень малый наклон, определяя тем самым малую индуктивность реактора. Вследствие резкого уменьшения самоиндукции возрастание напряжения на конденсаторе за время снижения тока до нулевого значения незначительно, восстановление напряжения происходит почти по аperiодической кривой. Чем круче характеристика намагничивания материала до насыщения и чем более пологая «горизонтальная» часть гистерезисной петли, тем ближе кривая восстанавливающегося напряжения к аperiодической. Демпфирующее действие вихревых токов в сердечнике и сопротивление обмотки еще больше приближают кривую восстанавливающегося напряжения к аperiодической кривой.

Если выпрямитель должен работать при различных углах регулирования и, следовательно, амплитуда скачка обратного напряжения может колебаться в широких пределах, указанный режим может быть обеспечен только при одном определенном значении скачка обратного напряжения.

Однако, как показано ниже, и при больших колебаниях скачка обратного напряжения выбор сопротивления для демпфирования колебаний определяется индуктивностью цепи при насыщенном реакторе. Вследствие этого величина демпфирующего сопротивления оказывается небольшой и не вызывает значительного повышения скорости восстановления напряжения.

Включение в выпрямительные цепи насыщающихся реакторов и емкостей, параметры которых подобраны так, чтобы обеспечить перемангничивание реактора и большую индуктивность цепи именно в период восстановления напряжения, предложено автором в 1948 г. после выполнения вышеприведенного анализа процессов в подобных схемах<sup>1</sup>.

В 1941 г. Коппельман [Л. 4] предложил контактные преобразователи с насыщающимися реакторами и емкостями в цепях выпрямления. Как легко показать, в контактных преобразова-

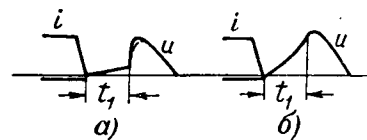


Рис. 2.

телях без дугогасящих устройств процесс идет иначе.

В контактных преобразователях Коппельмана обратный ток первоначально продолжает течь через контакты, а не через емкость. Поэтому реактор (как и указывал Коппельман) не входит в первую очередь для того, чтобы ограничить обратный ток величиной, которая может быть разорвана контактами в момент их размыкания. Емкость, шунтирующая контакты, должна обеспечить разрыв тока, сделав его безискровым. При этом соотношения получаются такими, что после размыкания контактов, пока происходит перемангничивание реактора, напряжение почти не восстанавливается, появляется так называемая «задержка» в восстановлении напряжения, которая практически начинается лишь после окончания перемангничивания реактора (рис. 2, а). После анализа процессов в схеме во время перемангничивания реактора Коппельман не приводит.

Для контактных преобразователей без дугогасящих устройств, применяемых при низких напряжениях, такие соотношения выполнимы, и с обязательным условием применения сердечников из дорогих материалов. Потери в контактах преобразователя во много раз меньше, чем в ртутном выпрямителе на эти напряжения, и применение его целесообразно даже в том случае, если стоимость сердечников реактора во много раз превысит полную стоимость ртутного выпрямителя.

Для ртутного выпрямителя применение реактора, как правило, целесообразно лишь в том случае, если стоимость его значительно меньше стоимости выпрямителя, что выполнимо при применении сердечников из холоднокатанной стали или из обычных железо-никелевых сплавов (типа пермаллой).

В 1945 г. Кастадони [Л. 5] предложил использовать насыщающиеся реакторы в цепях с ртутными выпрямителями для задержки восстановления напряжения. Он указывает, что после окончания перемангничивания реактора рост напряжения незначителен и напряжение восстанавливается мгновенно после окончания перемангничивания реактора, т. е. он выполняет реактор Коппельману. Анализа процесса Кастадони не дает, делает существенные ошибки в оценке действия схем и обнаруживает непонимание процесса восстановления напряжения на вентильных схемах выпрямления.

Как показывают расчеты для выпрямителя, предложенное автором выполнение схемы, обеспечивающее ее работу в режиме, характерном для рис. 2, б, может быть достигнуто с помощью реакторов с сердечниками из холоднокатанной трансформаторной стали при умеренных, вполне

<sup>1</sup> Авторское свидетельство № 75772 с приоритетом от 6 февраля 1948 г.

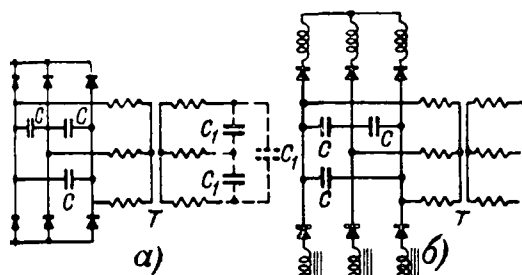


Рис. 3.

малых значениях емкостей. Применение инверторов из железо-никелевых сплавов позволяет в некоторых случаях обойтись без подключения специальных емкостей, ограничиваясь собственной емкостью выпрямительных установок.

Предложенное выполнение схемы выпрямления с резким снижением скорости восстановления обратного напряжения позволяет существенно повысить мощность и надежность в работе ряда типов ионных вентилях при умеренных дополнительных затратах. Большой эффект может быть достигнут в установках, где должны обеспечить возможность больших углов регулирования, например приводы экскаваторных станков или шахтных подъемников. Для проверки влияния скорости восстановления обратного напряжения на работу вентиля на базе ТВН УПИ были проведены исследования прона при токах до 120 а и напряжении до 1 кВ. Исследования показали, что при больших углах регулирования резкое снижение скорости восстановления обратного напряжения позволяет увеличить выпрямляемый ток в 3 раза при прочих равных условиях.

Наибольший эффект от применения насыщающихся реакторов в цепях с ионными вентилями получается в схемах ионных преобразователей частоты (инверторов с конденсаторной коммутацией) (рис. 3).

В этих схемах коммутация тока при зажигании очередного вентиля осуществляется разрядом конденсатора гасящего горящий вентиль конденсатора (С рис. 3). Вследствие ничтожно малой индуктивности разрядной цепи конденсатора восстановление тока в зажигаемом вентиле до полной величины, а следовательно, и прекращение его в выключаемом вентиле (т. е. коммутация) осуществляется во много раз быстрее, чем в выпрямительных установках (коммутация здесь длится микросекунды или даже доли микросекунд). В то же время вследствие ничтожной индуктивности цепи коммутации восстановление обратного напряжения на погашенном вентиле также происходит с очень большой скоростью (рис. 4, б). Только быстрое прекращение тока приводит к хранению интенсивной ионизации, следовательно, и большой проводимости во время нарастания обратного напряжения, также происходящего с очень большой скоростью. В результате ток может достигнуть величины того порядка, что и прямой ток, вызывая интенсивное распыление анодов, частые погасания и возбуждения в экситронах [Л. 2] и частые

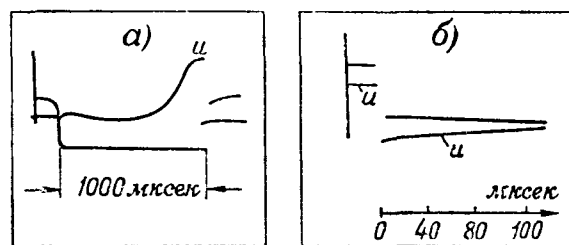


Рис. 4.

обратные зажигания. В этих условиях нормальный ионный вентиль не может работать устойчиво, особенно при высоких частотах.

Некоторое облегчение работы вентиля при преобразовании частоты может быть достигнуто включением дополнительной постоянной реактивности в цепь разряда гасящего конденсатора (также установкой конденсатора за инверторным трансформатором  $C_1$  рис. 3, а). Однако, допустимая величина индуктивности здесь ограничивается происходящим при этом уменьшением времени, предоставляемым схемой для восстановления запирающей способности сеток при неизменном опережении зажигания вследствие увеличения времени коммутации.

Применение насыщающихся реакторов (рис. 3, б), позволяющее резко увеличить время восстановления обратного напряжения и уменьшить его амплитуду при незначительном увеличении времени коммутации (рис. 4, а), обеспечивает многократное увеличение мощности вентиля в схеме преобразователя частоты (инвертора с конденсаторной коммутацией).

**Выбор параметров схем выпрямления с насыщающимися реакторами.** Расчет многих встречающихся на практике схем может быть сведен к простейшим схемам, изображенным на рис. 5.

Не касаясь здесь всего многообразия существующих схем выпрямления, рассмотрим в качестве примера схему Ларионова (рис. 6, а). Наиболее просто расчет осуществляется в случае, если

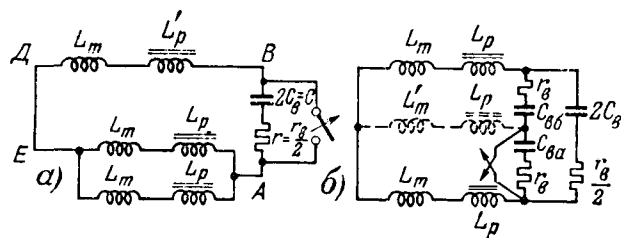


Рис. 5.

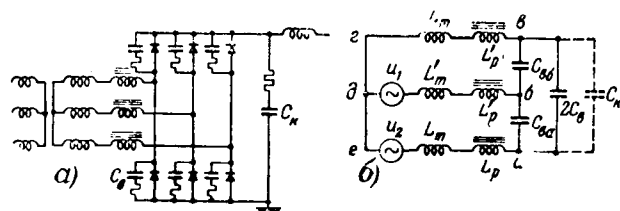


Рис. 6.

емкости  $C_{\delta}$ , шунтирующие вентили, и емкость катодного реактора  $C_k$  значительно превосходят емкости рассеяния насыщающихся реакторов, поскольку емкости трансформатора при этом можно не учитывать. Расчетная схема для этого случая преобразуется к схеме, приведенной на рис. 6,б. Восстановление напряжения на вентиле (на емкости  $C_{\delta a}$ ) схемы рис. 6,б может быть определено раздельным рассмотрением двух контуров рис. 5.

Действительно, после гашения дуги, принудительное падение напряжения в индуктивности каждой из коммутируемых фаз, определяемое протекающим током междофазного короткого замыкания, прекращается, что эквивалентно введению в этот момент в контур э. д. с.  $u_1$  и  $u_2$ , равных падению напряжения в каждой из фаз перед прекращением тока междофазного короткого замыкания.

В процессе восстановления напряжения перемагничивается лишь реактор  $L_p$  гасимой фазы, а реакторы двух других фаз остаются насыщенными. Вследствие этого ветви  $ae$  и  $vg$  симметричны.

Напряжение  $u_1$  восстанавливается в контуре  $d, б, а, е$ , рис. 6,б и в силу симметрии обеих ветвей  $б, а, е$  и  $б, в, г$  содержит одну частоту

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{(L_б + 0,5L_a 2C_с)}},$$

где  $L_б$  — индуктивность ветви  $бд$ ;

$L_a$  — индуктивность ветви  $vg$  или  $ae$ .

Напряжение  $u_2$  создает колебания, содержащие обе частоты контура.

В силу симметрии обеих половин контура  $а, б, в, г, д, е$  полное сопротивление каждой половины этого контура для токов с частотой только этого контура равно нулю, следовательно, токи с частотой этого контура не могут протекать через индуктивность ветви  $бд$  независимо от ее величины. Поэтому токи с частотой, определяемой только параметрами контура рис. 5,б, будут циркулировать в схеме и, следовательно, вторая частота всей схемы определяется только схемой рис. 5,б и равна  $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{2L_a \cdot 2,5C_с}}$ .

Вследствие равенства емкостей  $C_{\delta a}$  и  $C_{\delta б}$  напряжение, приходящееся на каждую из них в колебаниях с частотой  $\omega_2$ , равно  $\frac{u_2}{2}$ .

Падение напряжения в цепи  $бе$  от токов с частотой  $\omega_2$  равно нулю, поэтому напряжение  $u_2$  действует и на контур  $д, б, а, е$  (рис. 6,б), вызывая в нем ток с частотой  $\omega_1$ . В силу симметрии ветвей  $б, а, е$  и  $б, в, г$  этот ток делится пополам и амплитуда напряжения с частотой  $\omega_1$  создаваемая э. д. с.  $u_2$  на емкости  $C_{\delta a}$ , также равна  $\frac{u_2}{2}$ .

Таким образом напряжение, восстанавливающееся на емкости  $C_{\delta a}$  (рис. 5,б), состоит из двух частей: восстанавливающейся в схеме рис. 5,а, включаемой на напряжение  $u_1 + \frac{u_2}{2}$ , и другой,

восстанавливающейся в схеме рис. 5,б, включенной на напряжение  $\frac{u_2}{2}$ . При этом токи, протекающие

через  $L'_m$ , не зависят от напряжений, создаваемых  $C_{\delta a}$  и  $C_{\delta б}$  токами с частотой  $\omega_2$ , так как в отношении к точке  $б$  обе емкости имеют одинаковый потенциал противоположного знака. В колебаниях с частотой  $\omega_2$ , следовательно, воздействие на  $L'_m$  уравнивается.

Как следует из изложенного, для определения восстанавливающегося напряжения в схеме рис. 6,б с насыщающимися реакторами  $L_p$  можно точно рассчитать схему рис. 5,а с нелинейным реактором  $L'_p$ , поскольку расчет второй схемы известен. Восстанавливающееся на вентиле напряжение равно сумме напряжений обеих схем.

Напряжение, на которое нужно включать вторую расчетную схему при наличии насыщающихся реакторов, зависит от характеристики материальных сердечников. В момент, предшествующий прерыванию тока в гасимом вентиле, индуктивность реактора гасимой фазы определяется наклоном характеристики сердечника в интервале  $е$  (рис. 1,а). Во вступившей в работу фазе в этот момент протекает полный ток, следовательно, индуктивность реактора этой фазы, как и третья, определяется наклоном характеристики в области точки  $е$  (рис. 1,а).

Для большинства материалов динамический коэффициент самоиндукции при большом насыщении значительно меньше, чем перед прерыванием тока (когда ток составляет доли процента от полного), поэтому индуктивность реактора гасимой фазы уже перед гашением дуги значительно больше индуктивности остальных фаз. Вследствие неравенства индуктивностей обеих фаз перед гашением дуги падение напряжения в них неодинаково, следовательно, э. д. с.  $u_1$  и  $u_2$  (рис. 6,б) не будут одинаковыми ( $u_2 < \frac{U_0}{2}$ ,  $u_1 > \frac{U_0}{2}$ ).

Соотношение между ними зависит и от соотношения между индуктивностями реакторов обеих фаз перед гашением дуги и индуктивностей питающей сети.

Амплитуда колебаний второй частоты, зависящая от индуктивности перемагничиваемого реактора, может уменьшаться до 0,1 ... 0,05 и менее при соответствующем увеличении амплитуды восстанавливающегося напряжения первой частоты.

При необходимости можно снизить частоту  $\omega_2$ , включая дополнительную емкость (на выходе ( $C_k$  рис. 6,а), которая работает в сравнительно легких условиях и не может вызвать погасания вентиля).

**Приложение I.** Обозначим индуктивности:  $L_m$  — трансформатора и питающей сети на фазу;  $L_0$  — реактора в момент протекания выпрямленного тока;  $L_n$  — реактора в момент перемагничивания ( $i_{обp} < i_1$ );  $L_1 = 1,5L_m + 0,5L_0 + L_n$  — цепи восстанавливающегося напряжения в начальный период перемагничивания ( $i_{обp} < i_1$ );  $L_2$  — реактора в момент перемагничивания ( $i_2 > i_{обp} > i_1$ );  $L_2 = 1,5L_1 + 0,5L_0 + L_n$  — цепи восстанавливающегося напряжения при перемагничивании реактора.

В соответствии с рис. 1.

$$\frac{L_n}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{L_n}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{L_0}{\operatorname{tg} \alpha_0}, \quad \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{w}{l} \mu_{\partial 0},$$

$\mu_{\partial 0}$  — динамическая проницаемость материала сердечника;  
 $l$  — длина сердечника.

Напряжение короткого замыкания трансформатора и являющейся сети  $\epsilon_k$  обычно составляет 5...15% на фазу, может быть и больше. Во избежание чрезмерного снижения коэффициента мощности выпрямительной установки напряжение короткого замыкания реактора в данном состоянии должно быть ограничено, и в большинстве случаев нецелесообразно его брать превосходящим 2...3%.

Таким образом,  $L_0$ , а следовательно, и  $L_1$  и  $L_2$  определяются питающей сетью и характеристикой материала сердечника.

Демпфирующее сопротивление  $r$  (рис. 6,2) незначительно влияет на скорость восстановления напряжения, не выполнен без учета  $r$ . В дальнейшем показано, учесть его влияние.

Операторное уравнение для схемы рис. 5,а при данных  $i_c = i_1$  и  $u_c = u_1$  будет

$$u_c = \frac{U_0 + pL(i_{i=0} - U_1)}{Z(p) pC} + U_1, \quad (1,1)$$

которого получим:

напряжение на емкости

$$u_c = U_0 - \sqrt{U_0^2 - i_1^2 \frac{L_1}{C}} \cos \omega_2(t - t_1) + i_1 \sqrt{\frac{L_2}{C}} \sin \omega_2(t - t_1), \quad (1,2)$$

ток через емкость

$$i_c = \sqrt{\frac{C}{L_2} U_0^2 - i_1^2 \frac{L_1}{L_2}} \sin \omega_2(t - t_1) + i_1 \cos \omega_2(t - t_1). \quad (1,2')$$

Так как при  $u_c = u_0$ ,  $i_c = i_{c \max}$ , то при  $i_{c \max} \leq i_2$ , (1,2) и (1,2') получим<sup>2</sup>:

$$\omega_2(t_2 - t_1) = \arctg \frac{\sqrt{U_0^2 - i_1^2 \frac{L_1}{C}}}{i_1 \sqrt{\frac{L_2}{C}}}, \quad (1,3)$$

$$i_{c \max} = \sqrt{\frac{C}{L_2} U_0^2 + i_1^2 \frac{L_2 - L_1}{L_2}}, \quad (1,3')$$

$t_2$  — время заряда емкости до напряжения  $U_0$ .

Если  $i_{c \max} = i_2$ , то при  $t > t_2$

$$u_c = U_0 + i_2 \sqrt{\frac{L_1}{C}} \sin \omega_1(t - t_2),$$

уда видно, что амплитуда напряжения, восстанавливающегося на вентиле непосредственно после его погашения, в этом случае может превысить  $U_0$  не более чем

$i_2 \sqrt{\frac{L_1}{C}}$ . В действительности перенапряжений в этом киме практически не получается, так как неучтенные потери в сопротивлении обмотки и на вихревые токи вызывают дополнительные демпфирования колебаний. Рассмотрим работу вентиля с регулированием, когда скачка напряжения возрастает до  $kU_0$ , где  $k = \frac{\sin(\alpha + \gamma)}{\sin \gamma}$ .

необходимо учесть, что вследствие увеличения вихревых токов величина  $i_1$  также возрастет и  $\operatorname{tg} \alpha_2$  меняется.

<sup>2</sup>  $t_1$  обычно мало по сравнению с  $t_2$ .

В этом случае

$$u_c = kU_0 - (kU_0 - u_2') \cos \omega_1(t - t_2') + i_2' \sqrt{\frac{L_1'}{C}} \sin \omega_1(t - t_2'), \quad (1,4)$$

$$i_c = (kU_0 - U_2') \sqrt{\frac{C}{L_1'}} \sin \omega_1(t - t_2') + i_2' \cos \omega_1(t - t_2'), \quad (1,4')$$

откуда можно определить момент  $t_3$ , когда напряжение на конденсаторе достигнет величины  $kU_0$ :

$$\omega_1(t_3 - t_2') = \arctg \frac{kU_0 - U_2'}{i_2' \sqrt{\frac{L_1'}{C}}}, \quad (1,5)$$

где  $U_2'$  — напряжение на емкости в момент, когда ток через реактор равен  $i_2$ ;

$t_3$  — момент, когда  $u_c = U_0$ ;

$t_2'$  — момент, когда  $i_c = i_2$ .

Подставляя  $t_3$  вместо  $t$  в (1,4), (1,4'), (1,5), можно определить  $i_{c \max}$  и амплитуду перенапряжений

$$\Delta U = i_{c \max} \sqrt{\frac{L_1'}{C}} = \sqrt{(kU_0 - U_2')^2 + i_2'^2 \frac{L_1'}{C}}. \quad (1,6)$$

В уравнениях (1) — (6)

$$i_1 = \frac{H_1 l}{w} \quad \text{и} \quad i_2 = \frac{H_2 l}{w}, \quad (1,7)$$

где  $l$  — средняя длина сердечника реактора;  
 $w$  — число витков;

$H_1$  и  $H_2$  — характеризующая материал сердечника напряженность, при которой происходит перелом в кривой намагничивания.

Выведенные уравнения позволяют построить кривую восстанавливающегося напряжения, либо непосредственно определить время его восстановления и величину перенапряжения, если известно число витков на 1 см длины сердечника реактора. Однако  $\frac{w}{l}$  неизвестно заранее, так

как реактор не является заданным элементом выпрямительной схемы, а специально устанавливается для снижения скорости восстановления напряжения, следовательно, его параметры определяются заданным временем восстановления напряжения. Таким образом, в (1,1) ... (1,5)  $i_1$  и  $i_2$  необходимо заменить их значениями из (1,7).

Если вентиль работает без регулирования, то из (1,3) получим:

$$\frac{w}{l} = \sqrt{\frac{L_1 H_2^2 - (L_2 - L_1) H_1^2}{CU_0^2}}, \quad (1,8)$$

а из уравнений (1,3), (1,7) и (1,8) найдем<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned} \sqrt{C} &= \frac{t_2}{\sqrt{L_2} \arctg \sqrt{\frac{H_2^2}{H_1^2} - 1} + \sqrt{L_1} \arcsin \sqrt{\frac{L_1 H_1^2}{L_1 H_2^2 - (L_2 - L_1) H_1^2}}}. \end{aligned} \quad (1,9)$$

$l$  и  $w$  должны также удовлетворять уравнению

$$\frac{w^2 s}{l} \mu_{\partial 1} = L_n$$

<sup>3</sup> Значение  $C$  следует несколько увеличить для расширения диапазона выпрямленных токов, при которых перематничивание осуществляется полностью.

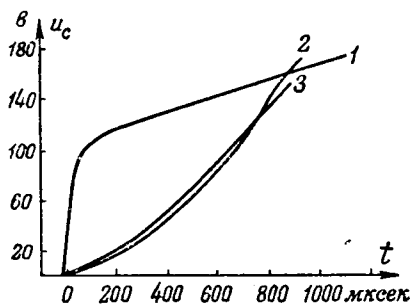


Рис. 7.

при заданном  $t_2$ , определяющем  $\frac{\omega}{l}$ , объем сердечника

$$sl = \frac{L_n}{\mu_{\partial 1}} \left( \frac{l}{\omega} \right)^2 [\text{м}^3]. \quad (\text{I}, 10)$$

Таким образом, заданное время восстановления напряжения может быть получено только при определенных емкости, числе витков на единицу длины магнитопровода  $\frac{\omega}{l}$  и весе сердечника. Эти четыре величины связаны тремя уравнениями, задавшись одной из них, получаем однозначные решения трех остальных.

На рис. 7 приведены расчетная 3 и экспериментальная 2 кривые восстановления напряжения в схеме рис. 6, 7. Для заданного времени восстановления напряжения расчетом определены параметры реактора и шунтирующая емкость, рассчитана и построена кривая восстановления напряжения при этих параметрах схемы, хорошо совпадающая с экспериментальной кривой.

Если задано время восстановления напряжения при работе выпрямителя со значительным углом регулирования, когда скачок напряжения возрастает до величины  $k' U_o$ , то для определения параметров схемы величину  $\frac{\omega}{l} = f(c) = \frac{\alpha}{\sqrt{C}}$ , найденную из (I, 8), необходимо подставить в (I, 4'), заменив в нем  $t'_2$  и  $U'_2$  вычисленными значениями. Это позволит построить кривую  $t_3 = f(C)$ , откуда при заданном  $t_3$  может быть определено  $C$ , следовательно, и  $\frac{\omega}{l}$ .

При наличии регулирования колебания восстанавливающегося напряжения могут быть значительны, создавая заметные перенапряжения (I, 6), что требует установок демпфирующих сопротивлений последовательно с емкостью. Перенапряжения в основном определяются нарастанием тока при насыщенном реакторе. Демпфирующее сопротивление, определенное, исходя из условий демпфирования колебаний в контуре рис. 5, 2 с постоянной индуктивностью  $L \left( r = 2\sqrt{\frac{L_1}{C}} \right)$ , получается завышенным. Однако время восстановления напряжения в основном определяется индуктивностью цепи в период перематнивания реактора  $L_n$ , поэтому такое демпфирующее сопротивление не окажет существенного влияния на время восстановления напряжения в цепи с насыщающимся реактором.

В приведенных расчетах полагалось, что напряжение сети мало изменялось за время восстановления напряжения, и принималось равным  $u = U_m \sin \left( \gamma + \frac{t_1}{2} \right)$ . Если  $U_m \sin \left( \gamma + \omega t \right)$  значительно больше, чем  $U_m \sin \gamma$ , то за рассматриваемый период напряжение сети с достаточной

точностью может быть выражено уравнением  $= U_o (1 + \alpha t)$ . Подставив это выражение вместо (I, 2), получим после преобразований, аналогичных приведенным, что в этом случае:

$$C = \frac{l^2}{\omega^2} \frac{[L_2 H_2^2 - (L_2 - L_1) H_1^2]}{U_o^2 - 2\alpha U_o L_2 \frac{l}{\omega} (H_1 + H_2)};$$

$$t_2 = \sqrt{L_2 C} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{U_o^2 - \frac{H_1^2 l^2}{\omega^2 C}}}{\frac{l}{\omega} H_1 \sqrt{\frac{L_2}{C} - \alpha U_o \sqrt{L_2 C}}} +$$

$$+ \sqrt{L_1 C} \operatorname{arcsin} \frac{H_1}{U_o} \cdot \frac{l}{\omega} \sqrt{\frac{L_1}{C}},$$

из которых  $C$  и  $\frac{l}{\omega}$  могут быть определены по нему.

**Приложение II.** Приближенную оценку порогов величин всех емкостей и параметров реактора можно произвести, считая, что ток в цепи восстанавливающегося напряжения сразу достигнет величины

$$i_o = \frac{H_1 + H_2}{2} \frac{l}{\omega}$$

и остается равным ему в течение всего времени перематнивания реактора<sup>5</sup>. Для схемы выпрямления такой расчет соответствует предположению, что характеристика перематнивания реактора имеет вид, изображенный пунктиром на рис. 1, 2 при пренебрежении индуктивностью трансформаторов и питающей сети во время восстановления напряжения. Для схемы преобразователя частоты (инвертора с конденсаторной коммутацией) такой расчет может дать приемлемый результат, особенно при выполнении сердечника реактора из высококачественных железо-никелевых сплавов.

Ток во все время восстановления напряжения считается постоянным, и напряжение на вентиле

$$u_s = i_o r + \frac{i_o}{C} t. \quad (\text{II}, 1)$$

Восстановление напряжения на вентиле закончится в момент  $t_o$ , когда оно станет равно мгновенному значению напряжения. Следовательно, в момент  $t_o$

$$u_s = i_o r + \frac{i_o}{C} t_o = U_o (1 + \alpha t_o) \quad (\text{II}, 2)$$

откуда

$$t_o = \frac{U_o - i_o r}{\frac{i_o}{C} - \alpha U_o}.$$

Напряжение на реакторе во время восстановления напряжения

$$\frac{dB}{\omega s dt} = U_o (1 + \alpha t) - i_o r - \frac{i_o}{C} t =$$

$$= \left( \frac{i_o}{C} - \alpha U_o \right) (t_o - t). \quad (\text{II}, 3)$$

<sup>5</sup> Для инвертора  $\alpha$  отрицательно.

<sup>6</sup> Для выпрямителя приближенный расчет скорости нарастания напряжения при известных параметрах реактора и в предположении прямоугольной характеристики перематнивания реактора и включении на постоянное напряжение дан в [Л. 6].

<sup>4</sup> Ввиду необходимости демпфировать также колебания в схеме рис. 5, 6, значительное снижение величины демпфирующего сопротивления допустимо лишь при  $L_n \gg L_o$ , так как в схеме рис. 5, 6  $L_p = L_o$ .

Если считать, что за время  $t_0$  реактор полностью намагничивается, получим:

$$t_0^2 = \frac{4B_s \omega^2 \rho}{l} \cdot \frac{C}{H_0 - \frac{aU_0 \omega C}{l}}, \quad (II,3')$$

$B_s$  — индукция насыщения.

При заданном времени восстановления напряжения  $t_0$

$$C = \frac{H_0 t_0^2}{\frac{4B_s L_0}{\mu_{\partial o}} (1 + x_0) + a r H_0 t_0^2}. \quad (II,4)$$

(II,4) и (II,2) получим число витков на единицу длины электропровода реактора:

$$\frac{\omega}{l} = \frac{4B_s L_0}{\mu_{\partial o} t_0 U_0} + \frac{H_0 r}{U_0}. \quad (II,5)$$

При этом необходимо учесть, что при принятой характеристике перемагничивания (рис. 1,б) принципиально не позволяет судить о необходимом  $r$ . При такой характеристике восстановление напряжения будет апериодическим даже при  $r=0$ .

Величину  $r$  в (II,5) следует считать постоянной и делением независимо так, как указывалось ранее, (II,5) позволяет определить  $\frac{\omega}{l}$ , что в свою очередь позволяет найти и объем сердечника. С учетом (II,5) получим:

$$sl = \frac{L_0}{\mu_{\partial o}} \frac{1}{\left( \frac{4B_s L_0}{\mu_{\partial o} t_0 U_0} + \frac{H_0 r}{U_0} \right)^2}; \quad (II,6)$$

$r \approx 0$

$$sl = \frac{U_0^2}{16 B_s^2} \frac{\mu_{\partial o}}{L_0} t_0^2. \quad (II,6')$$

Подсчеты по (II,4) и (II,5) показывают, что практически емкость не зависит от величины  $r$ . Что касается  $t_0$  то лишь при больших значениях  $L_1$ , требующих наличия больших демпфирующих сопротивлений, это значение увеличивается на несколько процентов. Но при больших значениях  $L_1$  эти формулы дают значительную погрешность. В этом случае целесообразно по формуле (II,6) определить погрешность (%), вносимую делением на  $r$ , и увеличить на погрешность значение  $\frac{\omega}{l}$ , полученное из уравнения (I,8).

При наличии регулирования, когда схема включается при напряжении  $kU_0$ , а перелом в кривой намагничивания

происходит при токе  $i'_0$ , из уравнений (II,1) и (II,3) (считая  $kU_0 = \text{посм}$ ) получим:

$$t'_0 = C \left[ \left( \frac{kU_0}{i'_0} - r \right) - \sqrt{\left( \frac{kU_0}{i'_0} - r \right)^2 - \left( \frac{U_0}{i'_0} - r \right)^2} \right]. \quad (II,7)$$

**Приложение III.** Составляющая тока реактора, компенсирующая вихревые токи в сердечнике, в момент перегиба кривой намагничивания сердечника зависит от местоположения точки первого перегиба в кривой намагничивания (точка  $d$  рис. 1,а).

Решая схему рис. 5,а с учетом вихревых токов, получим, что при изменении тока от величины, определяемой точкой  $d$ , до нулевого значения, составляющая тока в обмотке реактора, компенсирующая вихревые токи,

$$i_s = U_0 \frac{\delta^2 \mu_{\partial 1}}{12 L_1 \rho} \left( 1 - e^{-\frac{12 r L_1}{\delta^2 \mu_{\partial 1} (L_1 - L_n)} t} \right), \quad (III,1)$$

где  $\delta$  — толщина листов сердечника;

$\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала сердечника.

Если постоянная времени установления тока  $i_s$  меньше времени снижения тока через вентиль от  $i_0$  до нулевого значения, что для большинства материалов имеет место, ток достигнет установившегося значения (при  $\text{tg } \alpha_1 = \text{посм}$ )

$$i_{sy} = U_0 \frac{\delta^2 \mu_{\partial 1}}{12 L_1 \rho}. \quad (III,2)$$

Как следует из уравнений (III,2), вихревые токи зависят от отношения полной индуктивности цепи  $L_1$  и индуктивности реактора (определяемой  $\mu_{\partial 1}$ ).

### Литература

1. М. М. Акодис. Нарастание обратного напряжения при коммутации в ионных вентилях. Электричество, № 6, 1950.
2. И. А. Кричкова, В. Е. Поляков, В. М. Синьков. Погасание дуги возбуждения вентиля выпрямительно-инверторной установки. Электричество, № 4, 1952.
3. М. М. Акодис. О гашении дуги при наличии импульсного дутья. Электричество, № 12, 1939.
4. Коппельман. Контактный преобразователь. ETZ, № 1, 1941.
5. С. Кастадо. Новые возможности в коммутации при преобразовании электрической энергии. L'Electrotechnica, № 4, 1945.
6. Ю. Г. Толстов. Электромагнитные процессы в выпрямительных установках с нелинейными индуктивными дросселями. Известия Академии наук СССР (отделение технических наук), № 2, 1950.

[15. 12. 1951]



# Методика расчетов симметричных режимов работы дуговых печей

Кандидат техн. наук Р. И. КАРАЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Исследованию режимов работы мощных дуговых печей посвящены ряд экспериментальных и теоретических работ. Последние опубликованные работы в этой области [Л. 1 и 2] учитывают нелинейность дугового разряда. Авторы этих работ полагали, что в мощной печи напряжение на дуге не зависит от величины протекающего через нее тока и является лишь функцией ее длины. Эта идеализация, не принимающая во внимание пики зажигания дуги и имеющие место небольшие изменения напряжения на дуге под влиянием изменения протекающего тока, получена на основе опытных данных [Л. 3] и является удобным основанием к построению расчетной схемы. Она, очевидно, приближается к истине в режимах с непрерывным горением дуги и в большей степени отклоняется от нее при прерывистой работе дуговой печи.

В качестве расчетной методики в этих работах [Л. 1 и 2] применялся гармонический анализ, основанный на разложении в тригонометрические ряды прерывистого напряжения дуги и э. д. с. источника с последующим вычислением коэффициентов ряда промежуточных величин, на базе которых и были найдены значения, интересующие практику. Эта расчетная методика приводит к громоздким вычислениям, так как необходимая точность достигается при учете 10 членов ряда разложения. Для того чтобы в какой-то мере сделать возможным пользование этими материалами, построены [Л. 2] вспомогательные графики и номограммы. Однако эта весьма трудоемкая работа выполнена только для двух значений коэффициента  $\gamma$ , характеризующего условия работы установки, и потому этот материал является лишь иллюстрацией к возможности применения предложенной методики. Отсутствуют также формулы зависимости основных параметров, характеризующих работу печи (ток, мощность, к. п. д. и т. п.), от факторов, определяющих ее работу.

В то же время теоретическая электротехника располагает известным методом «припасовывания», которой мог быть с успехом применен к решению рассматриваемой задачи. Этот метод, предложенный академиком Н. Д. Папалекси еще в 1912 г. [Л. 4], применяется, в частности, для расчета цепей с выпрямителями. Эти цепи имеют много общего с рассматриваемой задачей. На базе этого метода, используя материалы цитируе-

Излагается метод расчета цепи электрической дуговой печи с учетом нелинейности. Выводятся формулы для вычисления токов и мощностей в различных режимах работы однофазных и трехфазных печей.

мых выше работ [Л. 1 и 2], и получены результаты, приведенные ниже.

## Однофазная печь

зависимости от дуги

дуги печь может работать в непрерывном и прерывистом режиме. Рассмотрим вначале прерывистый режим, так как формулы, характеризующие непрерывный режим работы, могут быть получены как частный случай формул прерывистого режима.

Расчетная схема дана на рис. 1. Напряжение на дуге меняет полярность с изменением направления тока в ней. В расчетной схеме это соответствует переводу рубильника из положения 1 в положение 3. Перерыв в питании (обрыв дуги) соответствует положению 2. Отсчет времени начинается с момента возникновения тока. Поэтому напряжение источника должно иметь начальную фазу

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

После прерыва ток в цепи возникает в тот момент времени, когда э. д. с. источника достигнет величины, равной напряжению дуги. Поэтому начальная фаза напряжения источника может быть вычислена как:

$$\psi = \arcsin \beta,$$

где  $\beta = \frac{E}{U_m}$ ,  $E$  — напряжение на дуге.

Дифференциальное уравнение электрической цепи:

$$Ri + L \frac{di}{dt} = U_m \sin(\omega t + \psi) - E. \quad (1)$$

Обозначив:  $\gamma = \frac{\omega L}{R}$  и  $\cos \varphi = \frac{R}{z}$ ,

а также учитывая, что при  $t=0$ ,  $i=0$ , имеем

$$i = \frac{U_m}{z} \left\{ \left[ \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{\beta}{\cos \varphi} \right] - \left[ \sin(\psi - \varphi) - \frac{\beta}{\cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega t}{\gamma}} \right\}. \quad (2)$$

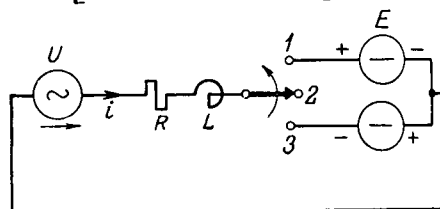


Рис. 1.

Продолжительность паузы тока  $\Delta$  можно получить, если подставить в уравнение (4):  $i=0$  при  $\omega t = \pi - \Delta$ .

Получаем трансцендентное уравнение:

$$\left[ \sin(\psi - \varphi - \Delta) + \frac{\beta}{\cos \varphi} \right] + \left[ \sin(\psi - \varphi) - \frac{\beta}{\cos \varphi} \right] e^{-\frac{\pi - \Delta}{\gamma}} = 0, \quad (5)$$

более удобную для расчета запись:

$$(\psi - \varphi - \Delta) + \frac{\beta}{\cos \varphi} - \gamma \cos(\psi - \varphi) e^{-\frac{\pi - \Delta}{\gamma}} = 0. \quad (6)$$

Результаты вычислений даны на рис. 2.

Активная мощность, поступающая из сети:

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi - \Delta} u i d\omega t,$$

также полезная мощность, выделяемая электрической дугой в печи:

$$P_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi - \Delta} E i d\omega t$$

исчисляются на базе зависимостей (1) и (4) и приведены в таблице (стр. 42) в виде формул (7) и (8) (см. также приложение I).

Располагая этими двумя величинами, легко можно вычислить остальные параметры, характеризующие работу печи.

Например, ток в подводящих проводах

$$I = \sqrt{\frac{P - P_n}{R}}, \quad (9)$$

п. д. установки:

$$\eta = \frac{P_n}{P}. \quad (10)$$

Коэффициент мощности всей установки в целом:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}. \quad (11)$$

Переходим теперь к рассмотрению режима непрерывного горения дуги. Уравнение (4) тока в цепи сохраняет свою силу.

Для того, чтобы определить начальную фазу  $\psi$  с источника, реализуем условие:

$$i = 0 \text{ при } \omega t = \pi.$$

Получаем:

$$\sin(\psi - \varphi) = -\frac{\beta}{\cos \varphi} \frac{1 - e^{-\frac{\pi}{\gamma}}}{1 + e^{-\frac{\pi}{\gamma}}} \quad (12)$$

или окончательно:

$$\psi = \varphi - \arcsin \left( \frac{\beta}{\cos \varphi} \operatorname{th} \frac{\pi}{2\gamma} \right). \quad (13)$$

Формулы для поступающей из сети активной мощности и для полезной мощности, потребляемой дугой, могут быть получены из равенств (7) и (8), принимая  $\Delta = 0$ . [Таблица, формулы (14) и (15)].

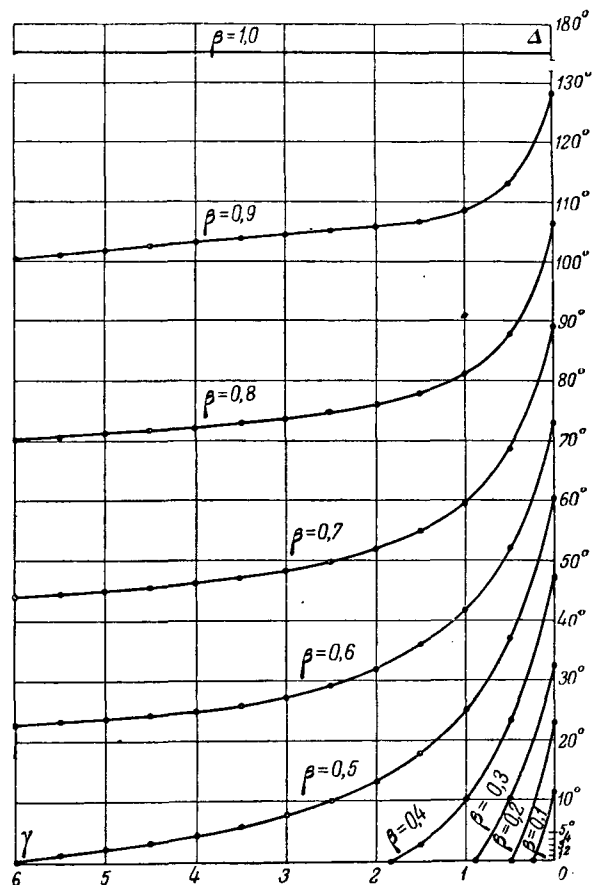


Рис. 2.

Для того чтобы завершить рассмотрение режимов работы однофазной печи, определим предельное значение

$$\beta_{np} = \frac{E_{np}}{U_m},$$

при котором совершается переход от непрерывного к прерывистому режиму горения дуги. Для этого решим совместно уравнения (2) и (12). Исключая величину  $\psi$ , получаем:

$$\beta_{np} = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \left[ 1 + (1 + \gamma^2) \operatorname{th} \frac{\pi}{2\gamma} \right]^2}}. \quad (16)$$

**Трехфазная печь.** Трехфазная установка с нулевым проводом не представляет большого интереса, так как падение напряжения в нулевом проводе незначительно, и схема может быть разбита на однофазные цепи. Рассмотрим трехфазную систему без нулевого провода в режиме прерывистого горения дуг (случай  $\Delta < \frac{\pi}{3}$ ). Предполагается, что система симметрична и что во всех трех фазах дуга имеет одинаковую длину, а значит и одинаковые, по абсолютной величине, напряжения. Полярность напряжения дуги принимается в соответствии с действительным направлением тока в фазе, что, конечно, не всегда совпадает с условным, „положительным“ направлением его. Последовательность включения и выключения фаз дана на схеме рис. 3.



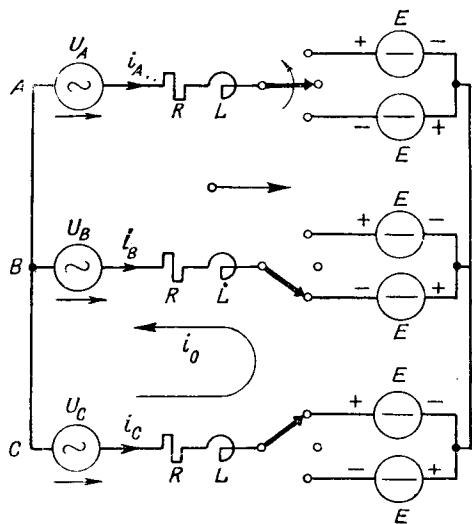


Рис. 3.

Примем за нуль момент возникновения тока в фазе  $A$  (рис. 3, 4). Контур, составленный фазами  $E$  и  $C$ , обтекается током  $i_o$ . Для интервала

$$0 < \omega t < \frac{\pi}{3} - \Delta$$

дифференциальные уравнения цепи будут:

$$Ri_A + L \frac{di_A}{dt} = u_A - E - u_o, \quad (17)$$

$$Ri_B + L \frac{di_B}{dt} = u_B + E - u_o. \quad (18)$$

$$Ri_C + L \frac{di_C}{dt} = u_C - E - u_o, \quad (19)$$

где  $u_o$  — смещение нейтрали нагрузки. Учитывая, что

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad \text{и} \quad u_A + u_B + u_C = 0,$$

получаем:

$$u_o = -\frac{E}{3}. \quad (20)$$

Начальную фазу э. д. с. можно получить из уравнений (17) и (20), реализуя условие:

$$\text{при } t=0, i_A = 0 \quad \text{и} \quad \frac{di_A}{dt} = 0,$$

получаем:

$$\psi = \arcsin \frac{2\beta}{3}. \quad (21)$$

Результат интегрирования дифференциальных уравнений (17), (18), (19) можно записать в виде:

$$i_A = \frac{U_m}{z} \left\{ \left[ \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] - \left[ \sin(\psi - \varphi) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega t}{T}} \right\}, \quad (22)$$

$$i_B = \frac{U_m}{z} \left\{ \left[ \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{4\beta}{3 \cos \varphi} \right] - \left[ \sin\left(\psi - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{4\beta}{3 \cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega t}{T}} \right\} - i_o, \quad (23)$$

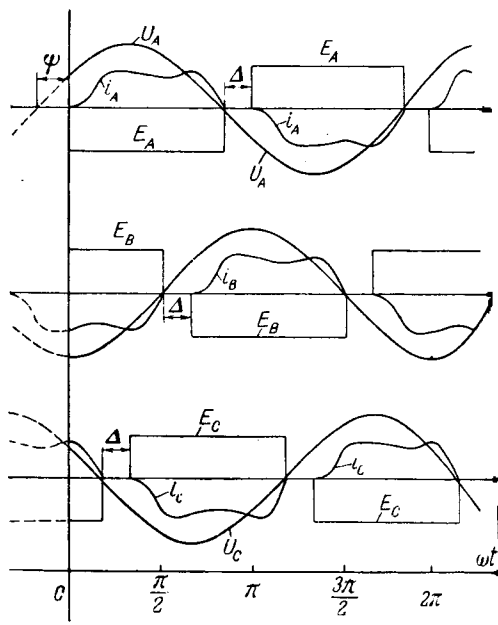


Рис. 4.

$$i_C = \frac{U_m}{z} \left\{ \left[ \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] - \left[ \sin\left(\psi - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega t}{T}} \right\} + i_o, \quad (24)$$

После отключения фазы  $C$  дифференциальное уравнение цепи для интервала:

$$\frac{\pi}{3} - \Delta < \omega t < \frac{\pi}{3},$$

запишется:

$$Ri'_A + L \frac{di'_A}{dt} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{6}\right) - E. \quad (25)$$

Его решение может быть получено в результате сопоставления со значением тока  $i_A$  из уравнения (22) при  $\omega t = \frac{\pi}{3} - \Delta$ . Получаем:

$$i'_A = \frac{U_m}{z} \left\{ \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{6}\right) - \frac{\beta}{\cos \varphi} \right] - \left[ \sin(\psi - \varphi) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega t}{T}} + 0,5 \left[ \sin(\psi - \varphi - \Delta) + \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega t - \frac{\pi}{3} + \Delta}{T}} \right\}. \quad (26)$$

В виду симметрии рассматриваемой системы ток в фазе  $A$  принимает значение  $i_o$  при  $\omega t = \frac{\pi}{3}$ .

Учитывая это обстоятельство, а также уравнение (24), можно записать:

$$i_C = \frac{U_m}{z} \left\{ \left[ \sin \left( \omega t + \psi - \varphi - \frac{4\pi}{3} \right) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] + \left[ \sin (\psi - \varphi) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] \left[ 0,5 - e^{-\frac{\pi}{3\tau}} \right] \cdot e^{-\frac{\omega t}{\tau}} + \left[ \sin \left( \omega t + \psi - \varphi - \Delta \right) + \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega t + \Delta}{\tau}} \right\}. \quad (27)$$

$\omega t = \frac{\pi}{3} - \Delta$  ток в фазе  $C$  обращается в нуль.

учаем трансцендентное уравнение, из которого можно определить продолжительность паузы  $\Delta$ :

$$\left[ \sin (\psi - \varphi) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] \left[ 0,5 - e^{-\frac{\pi}{3\tau}} \right] + \left[ \sin (\psi - \varphi - \Delta) + \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] \left[ 0,5 - e^{-\frac{\pi}{3\tau}} \right] e^{-\frac{\Delta}{\tau}} = 0, \quad (28)$$

более удобная для расчета запись:

$$\gamma \cos (\psi - \varphi) \left[ 0,5 - e^{-\frac{\pi}{3\tau}} \right] - \left[ \sin (\psi - \varphi - \Delta) + \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] \left[ 0,5 - e^{-\frac{\pi}{3\tau}} \right] e^{-\frac{\Delta}{\tau}} = 0. \quad (28')$$

Результаты вычислений даны на рис. 5.

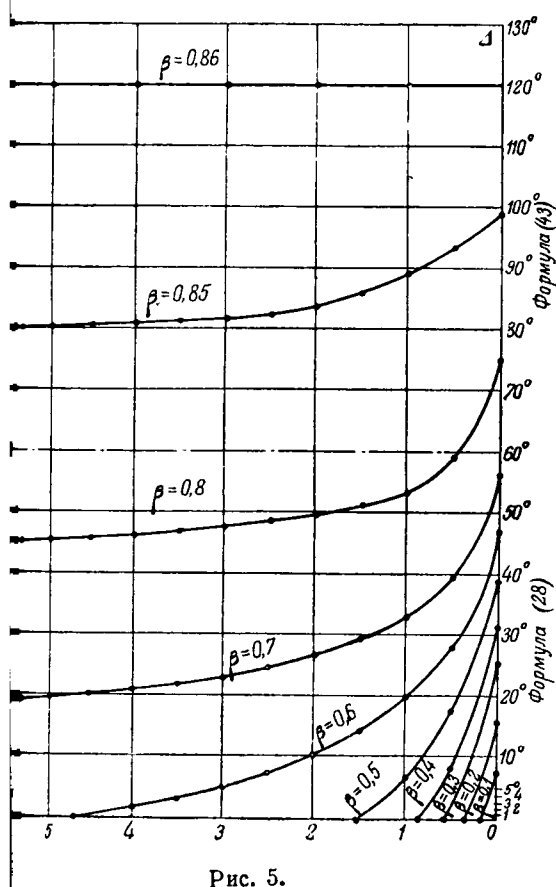


Рис. 5.

Учитывая (28), окончательно получаем:

$$i_C = \frac{U_m}{z} \left\{ \left[ \sin \left( \omega t + \psi - \varphi - \frac{4\pi}{3} \right) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] + \left[ \sin (\psi - \varphi) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega t - \frac{\pi}{3} + \Delta}{\tau}} \right\}, \quad (29)$$

$$i_B = -i_A - i_C = \frac{U_m}{z} \times \left\{ \left[ \sin \left( \omega t + \psi - \varphi - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{4\beta}{3 \cos \varphi} \right] + \left[ \sin (\psi - \varphi) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega t}{\tau}} - \left[ \sin (\psi - \varphi - \Delta) + \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega t - \frac{\pi}{3} + \Delta}{\tau}} \right\}. \quad (30)$$

Активная мощность, поступающая из сети по трем фазам:

$$P = \frac{3}{\pi} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3} - \Delta} (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) d\omega t + \int_{\frac{\pi}{3} - \Delta}^{\frac{\pi}{3}} (u_A i'_A + u_B i'_B) d\omega t \right\},$$

и полезная мощность, потребляемая трехфазной печью:

$$P_n = \frac{3}{\pi} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3} - \Delta} E (i_A - i_B + i_C) d\omega t + \int_{\frac{\pi}{3} - \Delta}^{\frac{\pi}{3}} E (i'_A - i'_B) d\omega t \right\},$$

вычисляются с помощью соотношений (22), (26), (29) и (30) и даны в таблице в виде формул (31) и (32) (см. также приложение II).

Переходим к рассмотрению режима непрерывного горения дуг в трехфазной печи.

Уравнения (22), (23) и (24) сохраняют силу. Начальная фаза э. д. с. источника  $\psi$ , а также начальное значение тока  $i_0$  могут быть получены из условий, что:

$$\text{при } \omega t = \frac{\pi}{3}, \quad i_A = i_0 \quad \text{и} \quad i_C = 0.$$

Решая совместно полученную таким способом систему двух уравнений, получаем начальную фазу э. д. с. источника:

$$\psi = \varphi - \arcsin \left( \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{2\pi}{3\tau}}}{1 - e^{-\frac{\pi}{3\tau}} + e^{-\frac{2\pi}{3\tau}}} \right) \quad (33)$$

и начальное значение тока

$$i_0 = \frac{U_m}{z} \left\{ \left[ \sin (\psi - \varphi) + \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] e^{-\frac{\pi}{3\tau}} - \left[ \sin \left( \psi - \varphi - \frac{\pi}{3} \right) + \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right] \right\}. \quad (34)$$

Полезная мощность, потребляемая трехфазной печью,

$$P_n = \frac{3}{\pi} \left[ \int_0^{\frac{\pi}{3}-\Delta} E (i_A - i_B + i_C) d\omega t + \int_{\frac{\pi}{3}-\Delta}^{\frac{\pi}{3}} E (i'_A - i'_B) d\omega t \right] = \frac{6E}{\pi} \left[ - \int_0^{\frac{\pi}{3}-\Delta} i_B d\omega t + \int_{\frac{\pi}{3}-\Delta}^{\frac{\pi}{3}} i'_A d\omega t \right] = \frac{3U_m^2 \beta}{\pi z} \left\{ \left[ \cos(\psi - \varphi) + \cos(\psi - \varphi - \Delta) \right] - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \left( \frac{4\pi}{3} - \Delta \right) + \gamma \left\{ \sin(\psi - \varphi) - \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right\} \left( 2e^{-\frac{\pi}{3\gamma}} - 2 \right) + \left\{ \sin(\psi - \varphi - \Delta) + \frac{2\beta}{3 \cos \varphi} \right\} \left( 2e^{\frac{\pi}{3}-\Delta} - 1 - e^{-\frac{\Delta}{\gamma}} \right) \right\}.$$

Используя равенство (28), получаем:

$$P_n = \frac{3U_m^2 \beta}{\pi R} \left[ \cos \psi + \cos(\psi - \Delta) - \frac{2\beta}{3} \left( \frac{4\pi}{3} - \Delta \right) \right]. \quad (32)$$

**Приложение III. Вывод формул мощности для трехфазной печи, при прерывистом горении дуг и при  $\frac{\pi}{3} < \Delta < \frac{2\pi}{3}$ .**

Используя зависимость (41), вычисляем активную мощность, поступающую из сети по трем фазам:

$$P = \frac{3}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}-\Delta} u_{AB} i d\omega t = \frac{3U_m^2}{\pi z} \left\{ \left( \frac{\pi}{2} - \frac{3\Delta}{4} \right) \cos \varphi + \frac{3}{8} \left[ \sin \left( 2\psi - \varphi - 2\Delta + \frac{2}{3}\pi \right) + \sin \left( 2\psi - \varphi + \frac{\pi}{3} \right) \right] + \frac{\sqrt{3}\beta}{\cos \varphi} \left[ \cos \left( \psi - \Delta + \frac{5\pi}{6} \right) - \cos \left( \psi + \frac{\pi}{6} \right) \right] + \right.$$

$$\left. + \sin \varphi \left[ \frac{3}{2} \sin \left( \psi - \varphi + \frac{\pi}{6} \right) - \frac{\sqrt{3}\beta}{\cos \varphi} \right] \right\}$$

$$\times \left[ \sin \left( \psi + \varphi - \Delta + \frac{5\pi}{6} \right) e^{\frac{2\pi}{3}-\Delta} - \sin \left( \psi + \varphi + \frac{\pi}{6} \right) \right]$$

Учитывая равенство (42), получаем:

$$P = \frac{3U_m^2}{\pi z} \left\{ \left( \frac{\pi}{2} - \frac{3\Delta}{4} \right) \cos \varphi + \frac{3}{8} \left[ \sin \left( 2\psi + \varphi + \frac{\pi}{3} \right) + \sin \left( 2\psi + \varphi - 2\Delta + \frac{2}{3}\pi \right) \right] - \sqrt{3}\beta \left[ \cos \left( \psi + \varphi + \frac{\pi}{6} \right) + \cos \left( \psi + \varphi - \Delta - \frac{\pi}{6} \right) \right] \right\}$$

Полезная мощность, потребляемая трехфазной печью,

$$P_n = \frac{3}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}-\Delta} 2E i d\omega t = \frac{3U_m^2 \beta}{\pi z} \left\{ \sqrt{3} \left[ \cos \left( \psi - \varphi + \frac{\pi}{6} \right) - \cos \left( \psi - \varphi - \Delta + \frac{5\pi}{6} \right) \right] - \frac{\beta}{\cos \varphi} \left( \frac{2\pi}{3} - \Delta \right) + \sqrt{3}\gamma \times \left[ \sin \left( \psi - \varphi + \frac{\pi}{6} \right) - \frac{2\beta}{\sqrt{3} \cos \varphi} \right] \left( e^{\frac{2\pi}{3}-\Delta} - 1 \right) \right\}$$

Используя равенство (42), получаем:

$$P_n = \frac{3U_m^2 \beta}{\pi R} \left\{ \sqrt{3} \left[ \cos \left( \psi + \frac{\pi}{6} \right) + \cos \left( \psi - \Delta - \frac{\pi}{6} \right) \right] - 2\beta \left( \frac{2\pi}{3} - \Delta \right) \right\}.$$

### Литература

1. С. И. Тельный. К теории трехфазной дуги с непроводящей подиной. Электричество, № 12, 1948.
2. Ю. Е. Ефроймович. Инженерные методы расчета дуговых печей с учетом нелинейности, вносимой дуговым разрядом. Электричество, № 12, 1948.
3. С. И. Тельный и Н. Т. Жердов. Осциллограммы тока и напряжения дуговых электрических печей. Теория и практика металлургии, № 2, 1936.
4. И. Д. Папалекси. О процессах в цепи переменного тока, содержащей электрический вентиль. Собрание трудов Изд. АН СССР, 1948.

# Новый метод профилактических испытаний аппаратных изоляторов

Кандидат техн. наук, доц. И. К. ФЕДЧЕНКО и  
кандидат техн. наук М. Е. ИЕРУСАЛИМОВ

Киевский политехнический институт

Опыт эксплуатации показывает, что изоляторы с мастичным заполнением (З5-Н, МКП-76 и др.) подвержены повреждениям, чем изоляторы других типов. По данным Сыромятникова [Л. 1],

то в 1946 г. в 28 энергосистемах имел место случай повреждения мастикаонаполненных изоляторов. Сравнительно частую повреждаемость изоляторов этого типа отмечают работники многих энергосистем [Л. 2, 3].

Основной причиной повреждений мастикаонаполненных изоляторов является образование дефектов в мастичном заполнении в виде раковин, пустотных включений, отслоения мастики от фарфорового сердечника или фарфоровой рубашки. Эти дефекты приводят к возникновению разрядов по поверхности бакелитового сердечника или по увлажненной внутренней поверхности фарфоровой рубашки и к повреждению изоляторов. Принятая в настоящее время программа испытаний мастикаонаполненных изоляторов: периодическое измерение угла диэлектрических потерь и б) испытание повышенным напряжением, не обеспечивает обнаружения этих дефектов. Во многих случаях поврежденные изоляторы до аварии нормальный  $\tan \delta$  и выдерживают рабочее напряжение [Л. 2, 3].

В связи с этим возникла необходимость поиска нового метода испытаний, который, наряду с существующими, дополнил бы программу испытаний, позволял бы безошибочно выявлять наличие дефектов в мастичном заполнении, а также судить об их опасности на основании данных о расположении и размерах дефекта в изоля-

*Излагается разработанный в лаборатории техники высоких напряжений Киевского политехнического института метод рентгеновского исследования мастикаонаполненных аппаратных изоляторов. Установлены оптимальные условия для просвечивания сложной структуры: фарфор—мастика—гетинакс. Проверка метода в условиях эксплуатации дала положительные результаты.*

ностью подтвердила возможность выявлять дефекты в мастике, фарфоре и гетинаксовом сердечнике изоляторов при помощи рентгеновского просвечивания.

**Выбор условий для просвечивания.** Различие в почернении рентгеновской пленки, обуславливающее выявление неоднородностей в просвечиваемой структуре, определяется отношением интенсивности рентгеновских лучей, падающих на соседние участки пленки. Ослабление рентгеновских лучей при прохождении через вещество определяется по соотношению

$$J_d = J_0 e^{-\mu d}, \quad (1)$$

где  $J_0$  — интенсивность падающих на изолятор лучей;

$\mu$  — линейный коэффициент ослабления рентгеновских лучей в веществе;

$d$  — толщина слоя данного вещества, см;

$J_d$  — интенсивность лучей, прошедших слой толщиной  $d$ .

Отношение интенсивностей лучей на участке пленки II—III (рис. 1) после прохождения через сложную структуру при наличии ( $J_2$ ) и отсутствии дефекта в виде полости  $v$  будет:

$$\frac{J_2}{J_1} = e^{\mu_m v}, \quad (2)$$

где в случае структуры рис. 1

$$J_1 = J_0 e^{-\mu_\phi A - \mu_m B - \mu_g C},$$

$A, B, C$  — толщины фарфора, мастики и гетинакса по ходу рентгеновских лучей<sup>1</sup>;  
 $\mu_\phi, \mu_m, \mu_g$  — линейные коэффициенты ослабления для фарфора, мастики и гетинакса.

Контрастность изображения дефекта на пленке зависит от коэффициента ослабления вещества, включающего дефект, и от размеров  $v$  дефекта (рис. 1). Ослабление лучей при прохождении через дефектный участок изолятора в виде воздушной полости при этом не учитывается.

<sup>1</sup> Например:  $A = 2[\sqrt{2r_1x - x^2} - \sqrt{r_2^2 - (x - r_1)^2}]$ .

е в 1933 г. И. К. Федченко применил рентгеновое просвечивание для обнаружения сдвига алюминиевой фольги в секциях конденсаторов, качество диэлектрика была бумага, пропитанное трансформаторным маслом [Л. 4]. В 1947 г. Федченко предложил рентгеновское просвечивание для обнаружения дефектов в высоковольтных изоляторах.

Работа, проведенная М. Е. Иерусалимовым с мастикаонаполненными изоляторами [Л. 5], пол-

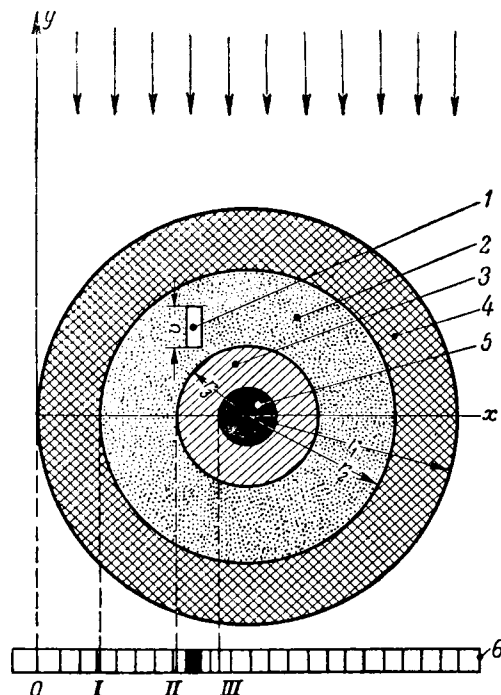


Рис. 1. Прохождение рентгеновских лучей через мастиконаполненный изолятор с гетинаксовым конденсаторным сердечником. 1—воздушное включение; 2—мастика; 3—гетинаксовый сердечник; 4—фарфоровая рубашка; 5—токоведущий стержень; 6—рентгенопленка.

Если  $\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n$  — линейные коэффициенты ослабления веществ;  $\rho_1, \rho_2 \dots \rho_n$  — соответствующие плотности элементов и  $k_1, k_2 \dots k_n$  — весовые доли входящих составных частей, то отношение  $\frac{\mu}{\rho}$  будет массовым коэффициентом ослабления соответствующих веществ, определяющим ослабление рентгеновских лучей в 1 г вещества. В нашем случае для сложной структуры общий коэффициент ослабления [Л. 6]

$$\frac{\mu}{\rho} = k_1 \frac{\mu_1}{\rho_1} + k_2 \frac{\mu_2}{\rho_2} + \dots + k_n \frac{\mu_n}{\rho_n}. \quad (3)$$

Коэффициенты ослабления зависят не только от характеристики вещества, но и от длины волны рентгеновских лучей. Приняв [Л. 8] в качестве исходного значения эффективную длину волны

$$\lambda_s = \frac{16,5}{U} [\text{Å}], \quad (4)$$

где  $U$  — амплитудное напряжение на рентгеновской трубке, найдем значение массовых коэффициентов ослабления для всех составляющих сложной структуры изолятора.

Взяв для предварительного расчета значение  $U = 55 \text{ кВ}$ , из (4) находим  $\lambda_s = 0,3 \text{ Å}$ .

Определим коэффициент ослабления для фарфора.

Фарфор состоит из 50% каолина, 25% полевого шпата, 25% кварца. Каолин имеет состав:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , полевой шпат —  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ , кварц —  $\text{SiO}_2$ . По данным рентгентехнических таблиц [Л. 6], находят коэффициенты

ослабления при  $\lambda = 0,3 \text{ Å}$  для всех составных частей фарфора за исключением кремния, для которого пользуются эмпирической формулой:

$$\frac{\mu}{\rho} = 0,0078 Z^{2,92} \lambda^{2,92} + 0,18,$$

где  $Z$  — порядковый номер элемента в периодической системе Менделеева.

#### Определение массового коэффициента ослабления для фарфора при $\lambda = 0,3 \text{ Å}$

№ п/п	Элементы	Молекулярный и атомный веса	Весовые доли $k$	Массовый коэффициент ослабления $\frac{\mu}{\rho}$ при $\lambda = 0,3 \text{ Å}$
1	Al	27	0,243	0,55
2	O	16	0,505	0,24
3	Si	28	0,252	0,7
4	Каолин $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	222	1	0,42
5	Al	27	0,1	0,55
6	O	16	0,46	0,24
7	Si	28	0,3	0,7
8	K	39	0,14	1,45
9	Полевой шпат $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	556	1	0,52
10	Si	28	0,467	0,7
11	O	16	0,533	0,24
12	Кварц $\text{SiO}_2$	60	1	0,46
13	Каолин		0,5	0,42
14	Полевой шпат		0,25	0,46
15	Кварц		0,25	0,46
16	Фарфор: 50% каолина, 25% полевого шпата, 25% кварца		1	0,46

Примечание. Массовые коэффициенты для номеров 12, 16, определяются по формуле (3), для номеров 3, 7, 10 — по формуле (5), остальные — по справочным таблицам.

На основании данных таблицы для  $\lambda = 0$  и уравнения (5) устанавливается зависимость массового коэффициента ослабления для фарфора от длины волны рентгеновского излучения.

При значении  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\phi} = 0,46$  (таблица) для  $\lambda = 0,3 \text{ Å}$  для постоянного коэффициента в (5) получим:

$$C = 0,0078 Z^{2,92} = \frac{0,46 - 0,18}{0,3^{2,92}} = 9,4.$$

Тогда для фарфора (5) примет вид:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\phi} = 9,4 \lambda^{2,92} + 0,18.$$

Аналогично для мастики (приложение)

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\mu} = 1,67 \lambda^{2,92} + 0,18.$$

Зависимости (6) и (7), пользуясь (4), построены на рис. 2 в функции от напряжения на трубке. Рассмотрение кривых рис. 2 показывает, что абсолютная величина коэффициентов ослабления для фарфора и мастики и разность между этими коэффициентами увеличивается при уменьшении напряжения на трубке.

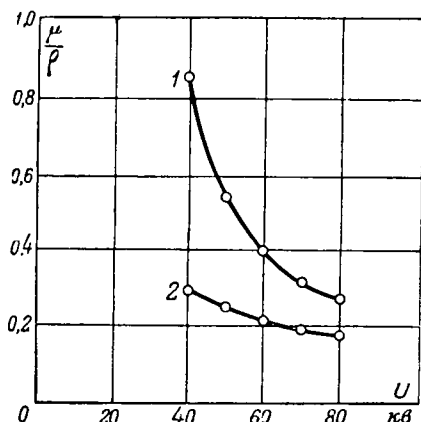


Рис. 2. Массовые коэффициенты ослабления для фарфора 1 и мастики 2 в зависимости от напряжения на рентгеновской трубке.

Полученная зависимость приводит к важному выводу в отношении выбора величины напряжения на трубке для обеспечения отчетливого снимка сложной структуры, включающей исконный внутренний дефект (воздушная полость). Одним из хороших контрастных снимков для выявления структуры фарфор—мастика—гетина является получение большей разности между коэффициентами ослабления рядом расположенных слоев.

Как видно из рис. 2, просвечивание дает наилучшие результаты при напряжении на трубке в 70 кВ.

Предел уменьшения напряжения на трубке определяется условием длительности просвечивания для получения отчетливого снимка в связи с тем, что при уменьшении напряжения снижается интенсивность рентгеновских лучей и сильно возрастает экспозиция.

Для двух различных значений напряжения на трубке относительное изменение экспозиции аналогично может быть определено из условий получения рентгенограмм, обладающих одинаковой плотностью почернения.

Плотность почернения

$$D = kJt^{0.8}, \quad (8)$$

$J$  — интенсивность падающих на пленку лучей;  
 $t$  — время просвечивания;

$k$  — коэффициент пропорциональности.

Принимая  $D$  постоянным, получим:

$$t = \left( \frac{D}{kJ} \right)^{1.25}. \quad (9)$$

Принимая во внимание, что

$$J = CU^2 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\phi} \rho_{\phi} d_{\phi} - \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{м}} \rho_{\text{м}} d_{\text{м}}},$$

меняя  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\phi}$  и  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{м}}$  через (6) и (7), при зна-

ках:

$$2.5 \frac{2}{\text{см}^3}, \rho_{\text{м}} = 0.9 \frac{2}{\text{см}^3}, d_{\phi} = 4 \text{ см}, d_{\text{м}} = 6 \text{ см},$$

(для изолятора ВМ-35-Н), после соответствующих преобразований (9) получим:

$$t = \frac{N}{U^{2.5}} \cdot e^{129 \left( \frac{16.5}{U} \right)^{2.92}} + 3.46, \quad (10)$$

где

$$N = \left( \frac{D}{kC} \right)^{1.25}.$$

Взяв для сравнения два напряжения — 50 и 60 кВ, найдем:

$$\frac{t_{50}}{t_{60}} = 12.2.$$

Следовательно, переход от 60 к 50 кВ, при неизменных прочих условиях, сопряжен с увеличением экспозиции примерно в 12 раз (для съемки с двумя усиливающими экранами, как это имеет место в нашем случае).

Полученный результат позволяет сделать заключение, что целесообразно проводить просвечивание при 60 кВ во избежание чрезмерно больших экспозиций при меньших напряжениях.

При просвечивании 35 кВ мастиконаполненных изоляторов в лабораторных условиях было установлено, что при амплитудном значении напряжения 60 кВ рентгенограммы получаются достаточно контрастными и изображения дефектов в мастике четкими. При этом напряжении и токе в трубке, равном 5 мА, потребовалась экспозиция в 3 мин.

Большая длина просвечиваемой части 35 кВ изоляторов затрудняет просвечивание их в один прием, так как при этом должно быть очень большое фокусное расстояние, что приведет к уменьшению интенсивности падающих на изолятор лучей и к увеличению экспозиции.

Поэтому было принято вести просвечивание изоляторов по длине в три приема при фокусном расстоянии в 30 см.

**Некоторые результаты просвечивания.** В ходе исследований изоляторов было установлено, что дефекты в мастике возникают не только при заливке, но также образуются в процессе эксплуатации. Изменение количества и размеров включений со временем под влиянием температурных колебаний было проверено в эксплуатационных условиях. С этой целью было проведено повторное просвечивание изоляторов через 3 мес. после первого. При просвечивании были выполнены все условия воспроизведения прежнего направления рентгеновых лучей и расположения кассеты с рентгеновской пленкой. Сопоставление полученных рентгенограмм показало, что расположение дефектов, их форма и размеры изменились, что характеризует явление „блуждающих“ дефектов.

Процесс перемещения и постепенного образования крупных дефектов делает особенно необходимым периодический контроль мастичного заполнения.

Таким образом, с помощью рентгеновского просвечивания оказывается возможным выявлять дефекты в мастике и фарфоре, определяя не только их наличие, но и количество, размеры,

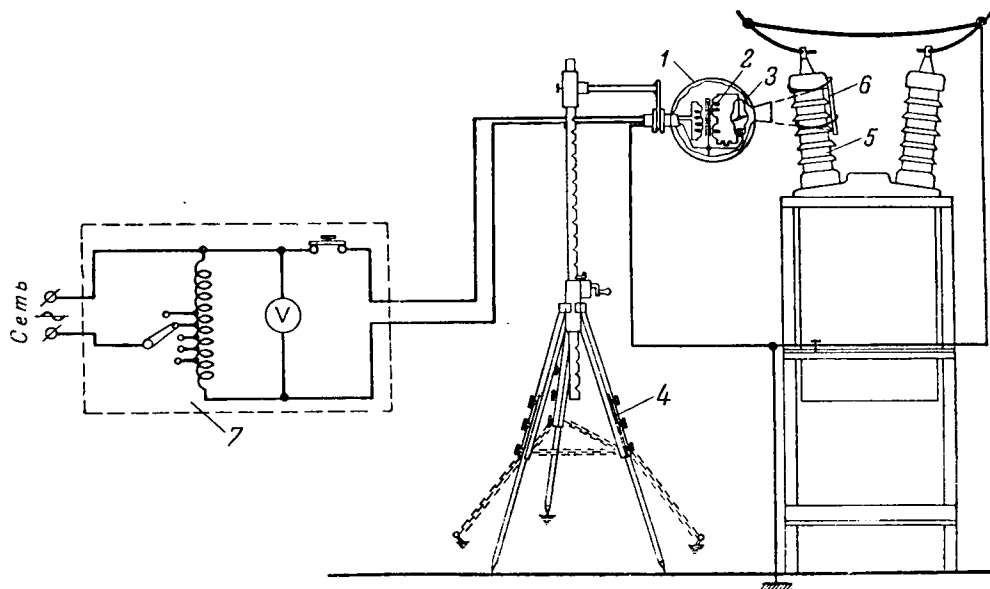


Рис. 3. Схема рентгеновского просвечивания изолятора ВМ-35-Н.

1 — камера с высоковольтным трансформатором и рентгеновской трубкой; 2 — высоковольтный трансформатор; 3 — рентгеновская трубка; 4 — телескопический штатив; 5 — изолятор; 6 — кассета с рентгеновской пленкой; 7 — автотрансформатор.

расположение, что позволяет судить о степени опасности дефектов.

Изоляторы, в мастичном заполнении которых обнаружены дефекты, должны подвергаться пере-заливке.

Для рентгеновского просвечивания на подстанциях без демонтажа изоляторов удобно пользоваться переносной портативной рентгеновской установкой, безопасной для обслуживающего персонала и позволяющей производить просвечивание изоляторов на значительной высоте от земли.

Общий вид такой установки во время просвечивания изоляторов на подстанции представлен на рис. 3.

Предлагаемый метод в сочетании с существующими методами контроля изоляторов позволяет установить наиболее точную картину состояния изоляции.

**Приложение. Определение массового коэффициента ослабления для мастики.** Мастика представляет собою сложную смесь углеводородов. При определении коэффициентов ослабления исходим из того, что углеводороды, входящие в состав мастики, имеют структурную формулу вида:  $C_n H_{2n}$ .

Для такого соединения, молекулярный вес которого равен  $12n + 2n = 14n$ , весовые доли элементов:

$$k_c = \frac{12n}{14n} = 0,86; k_h = \frac{2n}{14n} = 0,14.$$

Массовые коэффициенты ослабления для элементов при  $\lambda = 0,3 \text{ \AA}$ :

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = 0,195; \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_h = 0,42.$$

В таком случае, массовый коэффициент ослабления для мастики:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{маст}} = 0,86 \cdot 0,195 + 0,14 \cdot 0,42 = 0,23.$$

Уравнение (5) для  $\lambda = 0,3 \text{ \AA}$  может быть записано:

$$0,23 = 0,0078 Z^{2,92} \lambda^{2,92} + 0,18;$$

отсюда

$$C = 0,0078 Z^{2,92} = \frac{0,23 - 0,18}{0,3^{2,92}} = 1,67.$$

Общая зависимость коэффициента ослабления мастики от длины волны будет:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{маст}} = 1,67 \lambda^{2,92} + 0,18.$$

### Литература

1. И. А. Сыромятников. Вопросы эксплуатации электрической изоляции и требования к поставке изоляции. *Электричество*, № 2, 1949.
2. А. И. Долгинов. Профилактические испытания высоковольтных изоляторов. *Эл. станции*, № 10, 1948.
3. В. Л. Солодюз и Н. Г. Соловьев. Восстановление мастиконаполненных вводов. *Эл. станции*, № 1, 1949.
4. И. К. Федченко. Импульсная прочность стержневых конденсаторов на рабочее напряжение 3,6 и 10. *Эл. станции*, № 11—12, 1938.
5. М. Е. Иерусалимов. Профилактические испытания аппаратных изоляторов в энергосистемах методом рентгенодефектоскопии. Диссертация, 1950.
6. А. К. Трапезников. Рентгенодефектоскопия. Машгиз, стр. 423, 1948.
7. Я. С. Уманский, А. К. Трапезников, А. И. Китайгородский. Рентгенография. Машгиз, стр. 310, 1951.

# Расчет токов короткого замыкания в трехфазных цепях с последовательной несимметрией

Кандидат техн. наук Н. М. ГОРБАТОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

При передаче энергии на большие расстояния находят применение различные устройства для продольной компенсации параметров электропередачи. В ава-

рных случаях наличие этих устройств может вызвать любой вид нарушения последовательной симметрии трехфазной цепи.

Существующие в настоящее время методы расчета сложных несимметричных режимов электрических систем разработаны только для однофазных коротких замыканий и частных случаев последовательной несимметрии (например, выходы фаз и т. п.). Ниже рассматривается аналитический метод расчета, пригодный для любого вида последовательной несимметрии и произвольной схемы сети. Этот метод позволяет свести задачу в каждом отдельном случае к решению неизменных простейших уравнений, параметры которых определяются по предлагаемым условиям на основании схем отдельных последовательностей. Такой путь решения не требует составления схемы замещения.

Рассмотрим произвольную симметричную трехфазную цепь, в которую включены три несимметричных сопротивления  $Z_a$ ;  $Z_b$ ;  $Z_c$  (рис. 1).

Дан в общем виде метод определения токов и напряжений при несимметричном коротком замыкании в трехфазных системах, содержащих последовательную несимметрию. Приведены формулы для определения расчетных параметров. Даны указания о применении общего метода к некоторым частным случаям.

Разложим несимметричную систему падений напряжений на участках цепи  $aa'$ ;  $bb'$ ;  $cc'$  на симметричные составляющие:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{L0} \\ \dot{U}_{L1} \\ \dot{U}_{L2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a Z_a \\ i_b Z_b \\ i_c Z_c \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Так как трехфазная система за исключением участков  $aa'$ ,  $bb'$ ,  $cc'$  симметрична, матрица сопротивлений или проводимостей приводится к главным осям:

$$\begin{bmatrix} \dot{E} - \dot{U}_{L1} \\ -\dot{U}_{L2} \\ -\dot{U}_{L0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{L2} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{L0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L0} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Разложим на симметричные составляющие также и несимметричную систему токов  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ :

$$\begin{bmatrix} i_{L0} \\ i_{L1} \\ i_{L2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

На основании уравнений (1), (2) и (3) можно получить следующую систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3\dot{E} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Система уравнений (4) позволяет определить токи в трехфазной цепи при наличии последовательной несимметрии:

$$i_a = 3K'_Z \dot{E} \frac{0(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c)}{a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c)}, \quad i_b = 3K'_Z \frac{(Z_{L0} + Z_a)0(Z_{L0} + Z_c)}{(Z_{L1} + Z_a)\dot{E}a^2(Z_{L1} + Z_c)},$$

$$i_c = 3K'_Z \frac{(Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)0}{(Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)\dot{E}},$$

$$\text{где } K'_Z = \frac{1}{(Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) + (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) + (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c)} \quad (5)$$

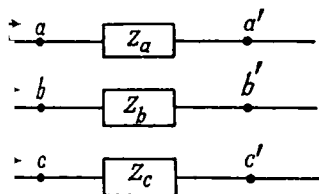


Рис. 1.



Разлагая токи  $I_a, I_b, I_c$  на симметричные составляющие, получим:

$$I_{L0} = \dot{E} K'_z \begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ 1 & 1 & 1 \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) \end{vmatrix}, \quad I_{L1} = \dot{E} K'_z \begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ 1 & a & a^2 \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) \end{vmatrix},$$

$$I_{L2} = \dot{E} K'_z \begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ 1 & a^2 & a \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) \end{vmatrix}$$

На основании уравнений (2), можно получить симметричные составляющие напряжений. Рассмотрим частные случаи.

Случай 1.  $Z_a \neq 0; Z_b = Z_c = 0$ . Уравнения (6) и (2) в данном случае дают:

$$I_{L0} = -\frac{\frac{\dot{E}}{Z_{L1}} \frac{1}{Z_{L0}}}{\frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{L0}} + \frac{3}{Z_a}}, \quad I_{L1} = \frac{\frac{\dot{E}}{Z_{L1}} \left( \frac{1}{Z_{L0}} + \frac{1}{Z_{L2}} + \frac{3}{Z_a} \right)}{\frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{L0}} + \frac{3}{Z_a}},$$

$$I_{L2} = -\frac{\frac{\dot{E}}{Z_{L1}} \frac{1}{Z_{L2}}}{\frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{L0}} + \frac{3}{Z_a}}, \quad \dot{U}_{L1} = \dot{U}_{L2} = \dot{U}_{L0} = \frac{\frac{\dot{E}}{Z_{L1}}}{\frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{L0}} + \frac{3}{Z_a}}.$$

Случай 2.  $Z_a = 0; Z_b = Z_c = Z \neq 0$ . В данном случае можно воспользоваться уравнениями (7), если заменить  $Z_a$  на  $-Z$  и  $Z_{L\alpha}$  на  $Z_{L\alpha} + Z$ . Такая замена вытекает из сравнения формул (6) для обоих частных случаев.

Рассмотрим более сложный случай одновременного несимметричного короткого замыкания при наличии последовательной несимметрии. Схему каждой последовательности в данном случае представим в виде четырехполюсника, удовлетворяющего уравнениям:

$$\begin{vmatrix} \dot{E} - \dot{U}_{K1} \\ -\dot{U}_{L1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{K1} Z_{LK1} \\ Z_{LK1} Z_{L1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{K1} - I_{3K} \\ I_{L1} - I_{3L} \end{vmatrix},$$

$$\begin{vmatrix} -\dot{U}_{K2} \\ -\dot{U}_{L2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{K2} Z_{LK2} \\ Z_{LK2} Z_{L2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{K2} \\ I_{L2} \end{vmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{vmatrix} -\dot{U}_{K0} \\ -\dot{U}_{L0} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{K0} Z_{LK0} \\ Z_{LK0} Z_{L0} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{K0} \\ I_{L0} \end{vmatrix}.$$

В некоторых случаях первую систему уравнений (8) бывает удобнее записать следующим образом;

$$\begin{vmatrix} \dot{E}_{3K} + \dot{E} - \dot{U}_{K1} \\ E_{3L} - \dot{U}_{L1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{K1} Z_{LK1} \\ Z_{LK1} Z_{L1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{K1} \\ I_{L1} \end{vmatrix},$$

где

$$\begin{vmatrix} \dot{E}_{3K} \\ \dot{E}_{3L} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{K1} Z_{LK1} \\ Z_{LK1} Z_{L1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{3K} \\ I_{3L} \end{vmatrix}.$$

На основании уравнений (1), (3), (8), можно получить следующие уравнения:

$$\begin{vmatrix} \dot{E} - \dot{U}_{K1} + E_{3L} S_{z1} + \dot{E}_{3K} \\ -\dot{U}_{K2} + \dot{E}_{3L} S_{z2} \\ -\dot{U}_{K0} + \dot{E}_{3L} S_{z0} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{10} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{20} \\ Z_{01} & Z_{02} & Z_{00} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \\ I_{K0} \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Уравнения (10) назовем расчетными уравнениями формы  $Z$ . Коэффициенты уравнений (10) в самом общем случае определяются через параметры схем отдельных последовательностей формулам, приведенным в таблице (стр. 51).

Для многих частных случаев, а также при  $Z_a \neq 0$ ; и  $Z_b = Z_c = 0$  уравнения (10) подчиняются принципу взаимности ибо, как следует из таблицы,  $Z_{12} = Z_{21}$ ;  $Z_{10} = Z_{01}$ ;  $Z_{20} = Z_{02}$ . При  $Z_a \neq 0$  и  $Z_b = Z_c = 0$  формулы таблицы принимают следующий вид:

$$Z_{aa} = Z_{Ka} - K_z Z_{LK\alpha}^2 \left( Z_{L\beta} + Z_{L\gamma} + \frac{3Z_{L\beta} Z_{L\gamma}}{Z_a} \right),$$

$$Z_{a\beta} = K_z Z_{LK\alpha} Z_{LK\beta} Z_{L\gamma},$$

$$S_{z1} = -K_z Z_{LK1} \left( Z_{L2} + Z_{L0} + \frac{3Z_{L2} Z_{L0}}{Z_a} \right),$$

$$S_{z2} = K_z Z_{LK2} Z_{L0},$$

$$S_{z0} = K_z Z_{LK0} Z_{L2},$$

$$(9) \quad \text{где } K_z = \frac{1}{Z_{L1} Z_{L2} + Z_{L2} Z_{L0} + Z_{L1} Z_{L0} + \frac{3Z_{L1} Z_{L2} Z_{L0}}{Z_a}}. \quad (11)$$

$Z_{11} = Z_{K1} + K'_2 Z_{LK1}$	$\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) & \\ -1 & -a & -a^2 \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) & \end{vmatrix}$	$Z_{20} = K'_2 Z_{LK2} Z_{LK0}$ $\begin{vmatrix} -1 & -a^2 & -a \\ (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) & \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) & \end{vmatrix}$
$Z_{22} = Z_{K2} + K'_2 Z_{LK2}$	$\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) & \\ (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) & \\ -1 & -a^2 & -a \end{vmatrix}$	$Z_{02} = K'_2 Z_{LK2} Z_{LK0}$ $\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) & \\ (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) & \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$
$Z_{00} = Z_{K0} + K'_2 Z_{LK0}$	$\begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) & \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) & \end{vmatrix}$	$Z_{01} = K'_2 Z_{LK1} Z_{LK0}$ $\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) & \\ -1 & -1 & -1 \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) & \end{vmatrix}$
$Z_{12} = K'_2 Z_{LK1} Z_{LK2}$	$\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) & \\ (Z_{L1} + Z_a)(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) & \\ -1 & -a & -a^2 \end{vmatrix}$	$S_{Z1} = K'_2 Z_{LK1}$ $\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) & \\ -1 & -a & -a^2 \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) & \end{vmatrix}$
$Z_{10} = K'_2 Z_{LK1} Z_{LK0}$	$\begin{vmatrix} -1 & -a & -a^2 \\ (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) & \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) & \end{vmatrix}$	$S_{Z2} = K'_2 Z_{LK2}$ $\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) & \\ -1 & -a^2 & -a \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) & \end{vmatrix}$
$Z_{21} = K'_2 Z_{LK1} Z_{LK2}$	$\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) & \\ -1 & -a^2 & -a \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) & \end{vmatrix}$	$S_{Z0} = K'_2 Z_{LK0}$ $\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) & \\ -1 & -1 & -1 \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) & \end{vmatrix}$

$$K'_2 = \frac{1}{\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) \end{vmatrix}}$$

Выразим уравнения схемы каждой последовательности через собственные и взаимные проводимости:

$$\begin{cases} \begin{vmatrix} i_{K1} - i_{3K} \\ i_{L1} - i_{3L} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{K1} - Y_{LK1} \\ -Y_{LK1} Y_{L1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{E} - U_{K1} \\ -U_{L1} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} i_{K2} \\ i_{L2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{K2} - Y_{LK2} \\ -Y_{LK2} Y_{L2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -U_{K2} \\ -U_{LK2} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} i_{K0} \\ i_{L0} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{K0} - Y_{LK0} \\ -Y_{LK0} Y_{L0} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -U_{K0} \\ -U_{L0} \end{vmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

Тогда на основании уравнений (1), (3) и (12) получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} \begin{vmatrix} i_{K1} + i_{3L} S_{Y1} - i_{3K} \\ i_{K2} + i_{3L} S_{Y2} \\ i_{K0} + i_{3L} S_{Y0} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{11} - Y_{12} - Y_{10} \\ -Y_{21} Y_{22} - Y_{20} \\ -Y_{01} - Y_{02} Y_{00} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{E} - U_{K1} \\ -\dot{U}_{K2} \\ -U_{K0} \end{vmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

Уравнения (13) назовем расчетными уравнениями формы  $Y$ . Их параметры могут быть определены по формулам таблицы. Для этого в формулах таблицы необходимо заменить:

$Z_{\alpha\alpha}$  на  $Y_{\alpha\alpha}$ ,  $Z_{\alpha\beta}$  на  $-Y_{\alpha\beta}$ ,  $S_{Z\alpha}$  на  $S_{Y\alpha}$ ,  $Z_{\delta}$  на  $Y_{\delta}$ ,  $Z_{L\alpha}$  на  $Y_{L\alpha}$ ,  $Z_{LK\alpha}$  на  $Y_{LK\alpha}$ ,  $Z_{K\alpha}$  на  $Y_{K\alpha}$ ,  $K_Z$  на  $K_Y$ .

В частном случае при  $Y_{\alpha} \neq 0$  и  $Z_b = Z_c = 0$  параметры уравнений (13) можно определять по формулам:

$$\begin{cases} Y_{\alpha\alpha} = Y_{K\alpha} - K_Y Y_{LK\alpha}^2, \\ Y_{\alpha\beta} = K_Y Y_{LK\alpha} Y_{LK\beta}, \\ S_{Y\alpha} = -K_Y Y_{LK\alpha}, \end{cases} \quad (14)$$

где

$$K_Y = \frac{1}{Y_{L1} + Y_{L2} + Y_{L0} + 3Y_{\alpha}}.$$

Придав формулам (11) и (14) форму  $Y$  путем соответствующей замены, их можно использовать и для случая, когда  $Y_{\alpha} \neq 0$ ;  $Y_b = Y_c = 0$ .

Следует заметить, что формулы (11) можно применять при  $Z_a = 0$  и  $Z_b = Z_c = Z$ . Для этого необходимо заменить  $Z_a$  на  $-Z$  и  $Z_{L\alpha}$  на  $Z_{L\alpha} + Z$ , а также придать им форму  $Y$  путем соответствующей замены. В таком виде уравнения (11) можно использовать также при  $Y_{\alpha} = 0$  и  $Y_b = Y_c = Y$ , заменив  $Y_{\alpha}$  на  $-Y$  и  $Y_{L\alpha}$  на  $Y_{L\alpha} + Y$ , что совершенно аналогично случаю простой несимметрии.

**Приложение 1.** Пример. Определим ток короткого замыкания прямой последовательности в сети рис. 2 при  $Z_b = Z_c = 0$ ,  $Z_a \neq 0$  и двухполюсном коротком замыкании фаз  $b$  и  $c$ .

Применение метода контурных токов для схемы прямой последовательности непосредственно дает:

$$\begin{vmatrix} \dot{E}_{II} - U_{K1} \\ \dot{E}_{II} - \dot{E}_I - \dot{U}_{L1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{III} Z_{III} \\ Z_{III} Z_I \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_{K1} \\ i_{L1} \end{vmatrix}. \quad (I,1)$$

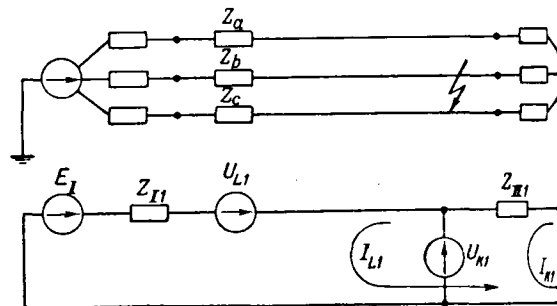


Рис. 2.

Следовательно,  $\dot{E}_{3K} = 0$ ,  $\dot{E}_{3L} = \dot{E}_{II} - \dot{E}_I$ . По аналог схеме прямой последовательности можно написать

$$Z_{Ki} = Z_{LKi} = Z_{III}; \quad Z_{Li} = Z_i = Z_{II} + Z_{III}.$$

Уравнения (10) в данном случае дают систему:

$$\begin{cases} \dot{E} - \dot{U}_{K1} + \dot{E}_{3L} S_{Z1} = Z_{11} i_{K1} + Z_{12} i_{K2}, \\ -\dot{U}_{K2} + \dot{E}_{3L} S_{Z2} = Z_{21} i_{K1} + Z_{22} i_{K2}. \end{cases}$$

Используя граничные условия, получим:

$$i_{K1} = \frac{\dot{E}_{II} + (S_{Z1} - S_{Z2}) \dot{E}_{3L}}{Z_{11} + Z_{22} - 2Z_{12}}.$$

Подставляя значение параметров согласно уравнения окончательно имеем:

$$i_{K1} = \frac{\dot{E}_{II} - (\dot{E}_{II} - \dot{E}_I) \frac{Z_0 Z_{II2} + Z_{III} (Z_2 + Z_0 + \frac{3Z_2 Z_0}{Z_a})}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0 + \frac{3Z_1 Z_2 Z_0}{Z_a}}}{Z_{III} + Z_{II2} - \frac{2Z_{III} Z_{II2} Z_0 + Z_{III}^2 (Z_1 + Z_0 + \frac{3Z_2 Z_0}{Z_a}) + Z_{II2}^2 (Z_1 + Z_0 + \frac{3Z_1 Z_0}{Z_a})}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0 + \frac{3Z_1 Z_2 Z_0}{Z_a}}}.$$

Если нас интересует ток  $i_{K1}$  для случая, когда  $Z_b = Z_c = Z$  при сохранении всех остальных условий неизменными, то его можно получить, заменив  $Z_i$  на  $Z_i$  и  $Z_a$  на  $-Z$ .

**Приложение II.** Условные обозначения, принятые в статье:  $\alpha, \beta, \gamma$  — любые из чисел ряда 0; 1; 2;  $i: 1, 2$  — индекс последовательности фаз;  $\delta$  — любая из фаз  $a, b, c$ , обозначающих фазы;  $\dot{U}_{Li}$ ;  $i_{Li}$  — симметричные составляющие напряжения и тока, вызванные наличием следовательной несимметрии;  $\dot{U}_{Ki}$ ,  $i_{Ki}$  — симметричные составляющие напряжения и тока короткого замыкания;  $Y_{Li}$ ,  $Y_{LK i}$ ,  $Y_{Ki}$ ,  $Z_{Li}$ ,  $Z_{LK i}$ ,  $Z_{Ki}$  — параметры схем отдельных последовательностей;  $Z_{\alpha\alpha}$ ,  $Z_{\alpha\beta}$ ,  $S_{Z\alpha}$ ,  $Y_{\alpha\alpha}$ ,  $Y_{\alpha\beta}$ ,  $S_{Y\alpha}$  — параметры расчетных уравнений;  $Z_{\delta} = \frac{1}{Y_{\delta}}$  — параметр, определяющие последовательную несимметрию.

## Литература

- Н. Н. Щедрин. К теории сложных несимметричных режимов электрических систем. Электричество, № 5, 1947.
- П. Л. Калайтаров. К теории пассивного шестиполосника. Труды ЛПИ, № 2, 1947.
- Г. Т. Адонц. К теории сложных несимметричных режимов электрических систем. Электричество, № 9, 1947.

# Метод получения основной кривой намагничивания

Инж. Г. С. ВЕКСЛЕР

Киев

Получение основной статической кривой намагничивания связано с большими ошибками, снятие первоначальной статической кривой,

так как эти кривые весьма близки друг к другу [1, 2], то для характеристики ферромагнетиков все пользуются основной статической кривой намагничивания. Снятие последней при помощи статического гальванометра занимает много времени, кропотливо, связано с субъективными ошибками при отсчете показаний гальванометра, требует магнитной подготовки и не дает объективной документации.

Известны методы получения динамической кривой, позволяющей определить ряд магнитных характеристик материала, но до сего времени не было метода, позволяющего быстро получить динамические основную и первоначальную кривые намагничивания.

В 1946 г. было высказано соображение о возможности применения осциллографической установки, на которой наблюдают динамические стационарные магнитные процессы [Л. 3] также и для получения первоначальной статической кривой намагничивания [Л. 4]. Суть этого предложения заключалась в том, чтобы заменить отсчет индукции  $\Delta B$ , производимого при баллистическом способе измерения по баллистическому гальванометру, отсчетом перемещения электронного луча в вертикальном направлении на экране осциллографа. Таким образом, кривую намагничивания снимали по отдельным точкам, получая объективную документацию и также медлен-

но, как и при измерении с помощью баллистической установки.

Очевидно, что этот метод не давал преимуществ по сравнению с существовавшими способами. Это предложение не получило применения, и до настоящего времени для снятия статических кривых намагничивания пользуются баллистическим методом.

Метод получения динамических основной и первоначальной кривых намагничивания. Принципиальная схема исследования представляет собой видоизмененную схему (рис. 1), применяемую для получения динамических стационарных петель  $B(H)$ . Для наблюдения основной кривой намагничивания нужно воздействовать на испытуемый образец рабочим «пакетом» напряженности магнитного поля  $H(t)$ , закон изменения которой приведен на рис. 2. Количество колебаний в каждой ступеньке должно быть примерно 6...10 [Л. 3] для того, чтобы могло произойти магнитное приспособление материала.

Число ступенек определяется количеством точек, которые образуют кривую намагничивания. Высота ступенек зависит от того, как исследователь хочет расположить экспериментальные точки на кривой намагничивания для более подробного рассмотрения того или иного участка кривой  $B(H)$ . Наибольшая высота крайней ступеньки должна быть такой, чтобы обеспечить насыщение образца.

Перед снятием кривой намагничивания необходимо привести материал в размагниченное состояние. В связи с этим экспериментальная

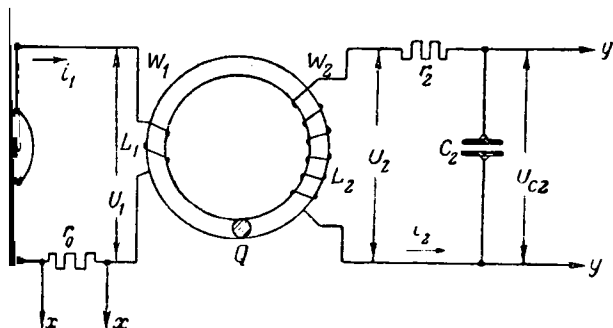


Рис. 1. Схема установки.

— к горизонтальным пластинам осциллографа; у — у — к вертикальным пластинам осциллографа.

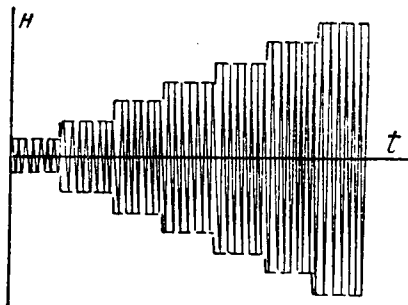


Рис. 2. Рабочий пакет напряженности магнитного поля.

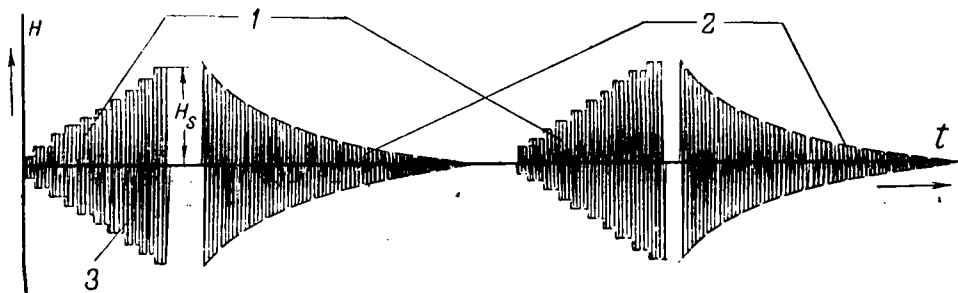


Рис. 3. Пакеты напряженностей магнитного поля.  
1—рабочие пакеты; 2—размагничивающие пакеты; 3—колебания заполнения пакета.

установка должна, помимо рабочих пакетов, дать еще и размагничивающие пакеты колебаний. Для удобства зрительного наблюдения необходимо рабочие и размагничивающие пакеты подавать на материал периодически (рис. 3) (остаточная индукция в результате размагничивания составляла около 0,5% от максимально возможной остаточной индукции в данном образце).

На время действия размагничивающих пакетов следует выключать луч осциллографа. Так как в результате воздействия рабочих пакетов в образце остается индукция  $B_r$ , а на конденсаторе  $C_2$  интегрирующей цепи — заряд, то одновременно с размагничиванием нужно производить короткое замыкание этого конденсатора.

Помимо динамической основной кривой, на экране осциллографа должны быть отчетливо видны динамическая гистерезисная петля предельного цикла и частные гистерезисные петли, соответствующие отдельным ступенькам. При желании получить предельный гистерезисный цикл более ярко светящимся на экране можно несколько удлинить время существования максимального поля.

С целью увеличения масштаба основной кривой вблизи малых значений  $B$  можно усилить напряжения, поступающие на отклоняющие пластины осциллографа, что позволит точнее снять кривую у ее нижнего загиба (при этом крайние части петель и основной кривой выйдут за пределы экрана).

Динамическая основная кривая намагничивания, полученная согласно описанной методике измерения, будет представлять собою геометрическое место вершин частных динамических петель. Так как скорость луча осциллографа при очерчивании вершины частного цикла значительно уменьшается (при синусоидальном изменении заполняющих колебаний), то при наличии достаточного числа частных циклов на экране будет отчетливо видна кривая, образованная отдельными вершинами петель. Особенно отчетливо основная динамическая кривая будет видна на экране электронно-лучевой трубки с длительным послесвечением.

Следует указать, что этим методом возможно измерение только образцов, имеющих малые потери на вихревые токи по сравнению с потерями на гистерезис.

Такая ограниченность специфична для осциллографического метода измерений динамических магнитных характеристик материалов.

Это имеет место вследствие закругления вершин магнитных петель и последовательного превращения петли в эллипс с ростом потерь на вихревые токи, в результате чего исчезает основная кривая, ранее видимая на экране. Для уменьшения влияния этого ограничения следует понизить частоту колебаний заполнения рабочего пакета до предела, допускаемого интегрирующей цепью в канале индукции.

Все магнитодиэлектрики, как имеющие малые потери на вихревые токи, можно испытывать при сравнительно высоких частотах и при этом упомянутое ограничение сказываться не будет.

Если предельная петля в исследуемом диапазоне частот не будет изменять своей ширины, то, следовательно, потери на гистерезис значительно преобладают над всеми остальными потерями и в этом случае динамические магнитные параметры будут весьма близки к статическим. Это обстоятельство позволяет значительно упростить и автоматизировать процесс снятия основной кривой намагничивания и гнезда гистерезисных петель, которые практически не будут отличаться от статических. При этом из результатов измерения исключаются субъективные ошибки, так как кривые можно фотографировать.

Если вместо рабочего пакета колебаний по дать на образец импульс с максимальным значением напряженности магнитного поля  $H_s$ , за время прохождения переднего фронта импульса при изменении значения  $H$  от нуля до  $H_s$  на экране осциллографа будет видна первоначальная кривая намагничивания. Чем более тугой фронт будет у импульса, тем полученная первоначальная кривая будет ярче и ее форма будет меньше зависеть от потерь на вихревые токи в образце. В качестве возбуждающего импульса может быть также использован отрезок синусоидального колебания с достаточно низкой частотой.

При подаче такого отрезка, длительность которого равна  $5/4$  периода, в качестве рабочего напряжения (рис. 4) можно получить первоначальную динамическую кривую намагничивания и динамическую предельную гистерезисную петлю. Яркость изображения в этом случае будет очень мала из-за сравнительно малой длительности рабочего напряжения. Этим способом можно исследовать явление магнитного приспособления материалов, если оно не соизмеримо с относительной погрешностью прибора (порядка 3%).

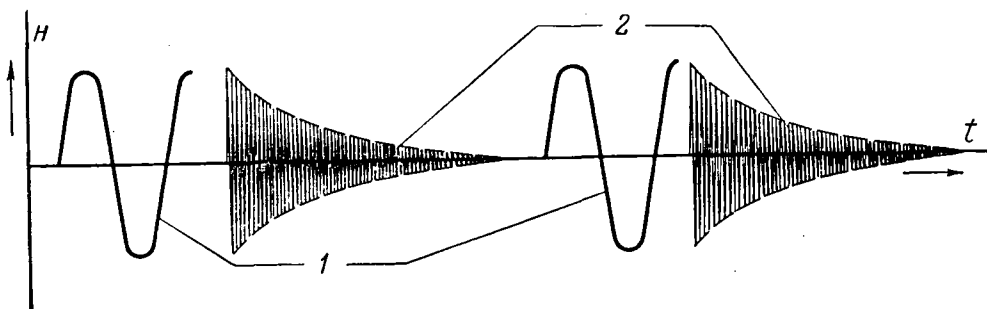


Рис. 4. Напряженность магнитного поля.

1 — рабочая напряженность поля; 2 — размагничивающие пакеты.

экспериментальная установка. Схема опытной новки приведена на рис. 5. Между главным преобразователем 1 (он же двигатель) и коммутатором 3 было установлено общее точное отношение 80:1. При двух парах щеток преобразователя 1 за каждый оборот коммутатора совершалось 160 заполняющих баний, которые генерировал преобразователь 1. Каждая ступенька огибающей рабочего тока была образована при помощи четырех со- щей, замкнутых накоротко, контактов 80-ти актного коммутатора 3; таким образом, для птного приспособления было отведено 8 кон- ний с неизменной амплитудой. Всего было тупенок, на что было выделено 40 контактов мутатора. Желательная амплитуда запол- щих колебаний в пределах одной ступеньки навливалась при помощи одного из линей- потенциометров 6. Для этой цели было заня- 0 потенциометров.

генератор 2 создавал колебания с частотой, а раза меньшей, нежели преобразователь 1. питании от генератора 2 потенциометров 6 в дом рабочем пакете помещалось только 4 за- щующих колебания, из которых каждое имело е больший период, чем при питании от пре- зователя 1.

ак как генератор и преобразователь не обла- достаточной мощностью, то генерируемые бания поступали в усилитель 8.

Размагничивание осуществлялось колебания- развиваемыми преобразователем 1, который в группу линейных потенциометров 7. Для агничивания были использованы 14 потенцио- ров; каждый давал напряжение на два замк- х друг с другом соседних контакта комму-

татора 3. Таким образом, размагничивание было обеспечено 14-ступенчатой огибающей с соответ- ственно подобранными амплитудами заполня- щих колебаний. Огибающая последних подбиралась так, чтобы нулевая отметка  $B=0$ ;  $H=0$  на экране осциллографа оставалась неподвижной.

Чередование процессов, полученное при помо- щии коммутатора 3 и примененное для получения динамической кривой намагничивания, приведено на рис. 6. Для возможности получения рабо- чего пакета, начинающегося с наибольшего зна- чения напряженности магнитного поля, 80-й кон- такт соединяется не непосредственно с землей, а через сопротивление  $r=5$  ком. Это предохра- няет, с одной стороны, контакты коммутатора и щетку от обгорания, а с другой — усилитель 8 от самовозбуждения и сильных индукционных помех. С этой же целью было поставлено сопротивление 5 ком между контактами 42 и 43, так как разма- гнивающий пакет также начинался колебаниями с большой амплитудой.

Эксцентрик 4, насаженный непосредственно на вал коммутатора 3, осуществлял короткое замы- кание конденсатора  $C_2$  интегрирующей цепи на время размагничивания образца. Эксцентрик 5, влияя на яркость луча осциллографа, включал луч на время воздействия рабочих пакетов на образец.

Экспериментальное исследование и его резуль- таты. Частные магнитные петли стальной отож- женной проволоки диаметром 0,5 мм, соответ- ствующие такому характеру намагничивания, приведены на рис. 7. На нем отчетливо видны все частные динамические петли, предельная петля и образованная вершинами этих петель основная динамическая кривая намагничивания. При изме- рении данного образца в диапазоне частот до 160 гц не было обнаружено расширения предель-

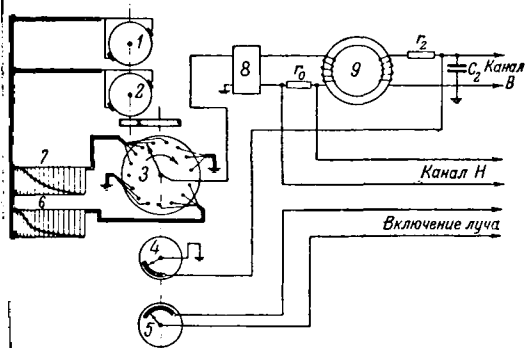


Рис. 5. Схема экспериментальной установки.

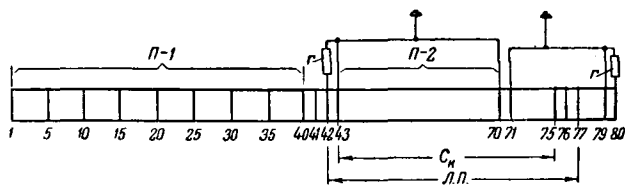


Рис. 6. Чередование процессов коммутатором.  
П-1 и П-2 потенциометры; Л. П. — луч погашен;  $r=5$  ком.  
 $C_k$  — конденсатор  $C_2$  замкнут накоротко.

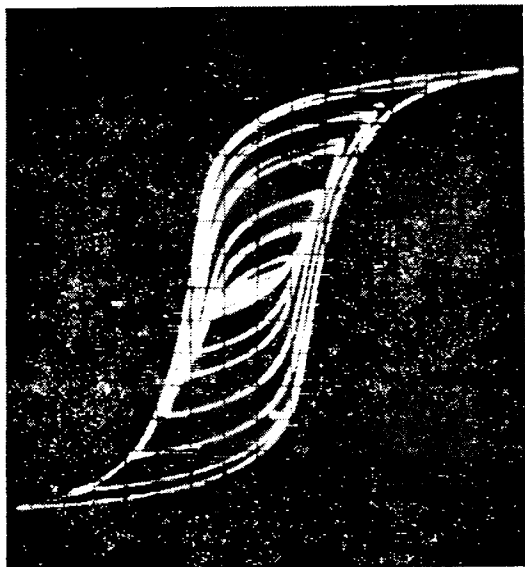


Рис. 7. Семейство магнитных петель для стальной проволоки.

ной петли и закругления вершин частных петель, что свидетельствовало о значительном преобладании в нем потерь на гистерезис по сравнению со всеми остальными потерями.

Это обстоятельство позволило считать, что полученное динамическое гнездо петель и динамическая основная кривая являются также и статическими. На получение изображения, приведенного на рис. 7, понадобилось всего 2...3 сек., в то время как для получения этих же кривых при помощи баллистической установки потребовалось бы больше рабочего дня. Что касается погрешности измерения, то при сравнении магнитных параметров, полученных из статической и динамической предельных петель, расхождение в величинах  $H_c$ ,  $H_s$ ,  $B_c$  и  $B_s$  соответственно не превышало 5% [Л. 5]. Нет оснований полагать, что основные кривые намагничивания, полученные означенными двумя способами, должны различаться друг от друга на большую величину.

На рис. 8 дано фото  $B(H)$ , полученное при воздействии тем же намагничивающим полем при частоте 160 гц на сердечник, свитый из пермаллоевой проволоки. В этом образце с малыми потерями на гистерезис [Л. 6] динамические петли превратились в эллипсы, и предлагаемый метод при данной частоте применить нельзя.

**Упрощенный метод получения основной кривой намагничивания.** Из рис. 6 следует, что для наблюдения нужного нестационарного процесса требуется: а) подать на образец рабочий пакет колебаний, б) подать на образец размагничивающий пакет колебаний, в) выключить луч осциллографа на время размагничивания, г) замкнуть накоротко конденсатор интегрирующей цепи на время размагничивания. Операции б, в и г являются необходимыми лишь вследствие того, что в результате воздействия рабочего пакета колебаний (рис. 7), а на конденсаторе интегрирующей цепи — заряд.



Рис. 8. Семейство магнитных петель для пермаллоя.

Если в качестве рабочего пакета воспользоваться монотонно убывающей напряженностью поля, которая одновременно произведет и размагничивание образца, то операции б, в и г окажутся ненужными. На этом принципе основан упрощенный метод получения динамической основной кривой намагничивания. Этот метод значительно упрощает аппаратуру, необходимую для его осуществления.

При подаче намагничивающего поля, изменяющегося так, что это показано на рис. 9, при луч осциллографа не выключался и конденсатор интегрирующей цепи не замыкался накоротко, все же была получена четкая (не размытая) основная кривая. Этот опыт подтверждает, что основные кривые, получаемые как при возрастающем, так и при убывающем полях, практически не отличаются друг от друга.

Для применения упрощенного метода осталось обеспечить необходимое условие, а именно размагничивание образца рабочим пакетом. Для этого нужно было значительно увеличить число ступенек и отношение последующего максимального значения  $H_{m,n+1}(t)$  к предыдущему  $H_{m,n}(t)$ . Подробные исследования размагничивания показали, что следует позаботиться о величине в области напряженностей магнитного поля, переходящих на крутую часть основной кривой намагничивания. Недостаточная степень размагничивания обнаруживается по «плаванию» нулевой точки и утолщению линий магнитных петель.

Однако рост числа ступенек связан с нежелательным увеличением количества потенциометров и усложнением коммутатора, поэтому была проведена вместо ступенчатой огибающей — линейная огибающая. Для этого вместо коммутатора и функциональных потенциометров был применен один линейный потенциометр, выполненный из тонкой проволоки, свитой в спираль, насаженной на обод диска. Движок потенциометра, скользящий по ободу диска, был закреплен на валу коммутатора и при его вращении

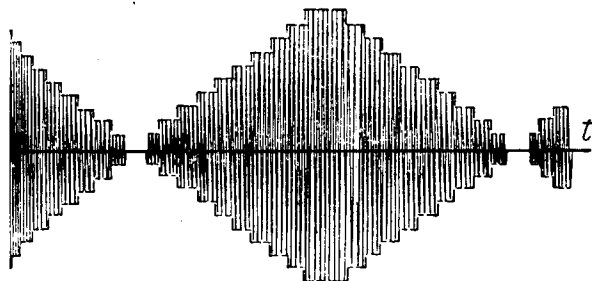


Рис. 9. Пакеты напряженностей магнитного поля.

оде потенциометра получалась нужная форма  $I$ . За один оборот движка потенциометра получалось 160 колебаний от преобразователя  $I$ , максимальное значение которых линейно уменьшалось на  $1/160$  от своего максимального значения  $H_z$ . Известно [Л. 7], пятидесяти колебаний вполне достаточно для размагничивания носителя магнитной записи, где предъявляются более жесткие требования, чем в данном случае. Таким образом, применяя линейную огибающую, удается чрезвычайно упростить установку.

Остается выяснить, насколько кривая, получаемая как геометрическое место точек вершин магнитически незамкнутых частных петель, будет отличаться от основной кривой, полученной на рис. 7. Применение линейной огибающей дает такую же основную кривую, как и ступенчатая огибающая, если влияние эффекта магнитного рассеяния не будет заметно на экране осциллографа, что и было подтверждено опытом. Таким образом, упрощенный метод снятия основной кривой намагничивания себя оправдал. На рис. 7 отчетливо видны все частные магнитные петли, что оказалось возможным вследствие примененной жесткой синхронизации колебаний с движением щетки коммутатора. И все же удовлетвориться наблюдением предельной петли и основной кривой, что вполне достаточно, то установка может быть еще более упрощена. В этом случае источником колебаний намагничивания может служить любой генератор переменного тока, в том числе и сеть переменного тока!

**Погрешности измерений величин  $B$  и  $H$ .** При измерении величин  $B$  и  $H$  возможны погрешности, связанные с: а) параметрами схемы измерения; б) неточностью отсчета; в) неточностью градуировки.

Подробный анализ погрешностей измерений, выполненный с выбором параметров схемы, проверенный экспериментально, привел к следующим результатам.

1. При  $\frac{I_2 \omega_2}{I_1 \omega_1} \leq 0,001$  [Л. 8] реакция вторичной



Рис. 10. Основная кривая и предельная магнитная петля.

цепи практически не сказывается на петле, видимой на экране, и погрешность в величине  $H$  не удается отметить. Получить требуемое соотношение можно при достаточно большой величине  $r_2$ .

2. При угле фазной ошибки, вносимой несовершенной интегрирующей цепью  $\psi(\omega) \leq 1^\circ$ , погрешность в измерении величины  $B$  практически не удается обнаружить. Для этого величина  $2\pi f_n C_2 r_2$  должна быть не менее 60 при малых индуктивных сопротивлениях рассеяния и пренебрежимо малой нагрузке интегрирующей цепи. Здесь  $f_n$  — наиболее низкая частота, на которой проводится исследование (приложение).

Таким образом, соответственно подобрав величины  $r_2$  и  $C_2$ , можно погрешности, связанные с параметрами схемы, сделать значительно меньше тех, которые вызваны неточностью отсчета. Поэтому погрешностями, вносимыми элементами схемы, можно пренебречь.

Перейдем к определению погрешностей, указанных в пунктах б и в.

Как это принято в измерительной технике, была определена величина возможной погрешности при номинальном отклонении луча на экране, т. е. приведенная погрешность. Мы различали два случая: относительные и абсолютные измерения. В первом случае речь шла о сравнении двух или нескольких величин индукций или напряженностей поля между собой. При проведении абсолютных измерений рассматривалось определение абсолютных значений  $B$  и  $H$ .

Принимая, что: 1) номинальное отклонение луча от центра экрана составляет 60 мм, 2) диаметр светящейся точки на экране равен 1,5 мм, 3) точность отсчета величины отклонения луча на экране — 0,75 мм, получим приведенную погрешность при относительных измерениях

$$\gamma_1 = 2 \cdot \frac{0,75}{60} \cdot 100 = 2,5 \%$$

На рис. 10 дано фото основной кривой и предельной петли, полученных упрощенным методом.



Градуировка производится при намагничивании образца от сети переменного тока путем измерения на катушке напряжения, дающего отклонение луча. Максимальное значение индукции, соответствующее данному отклонению луча, будет:

$$B_m = \frac{U_r \cdot 10^8}{4k_u f \omega_2 Q}, \quad (1)$$

где  $U_r$  — напряжение на концах измерительной катушки, в;

$k_u$  — коэффициент формы кривой напряжения сети;

$f$  — частота сети — 50 гц;

$\omega_2$  — число витков измерительной катушки;

$Q$  — поперечное сечение ферромагнетика, см<sup>2</sup>.

Считая, что при определении отдельных величин возможны следующие относительные ошибки:  $U_r = 1\%$ ;  $Q = 0,4\%$ ;  $f = 1\%$ ;  $k_u = 2\%$  (принимая  $k_u = 1,11$ ); в отсчете отклонения луча — 1,25% (0,75 мм при номинальном отклонении 60 мм), получим наибольшую приведенную погрешность при градуировке в определении  $B$ :

$$\gamma_{2B} = 1 + 2 + 1 + 0,4 + 1,25 \approx 6\%.$$

Градуировку канала  $B$  можно также производить, подавая вместо напряжения  $U_{c_2}$  известное напряжение  $U_r$  на канал  $B$ , замечая при этом отклонения луча по вертикали  $y_r$ . Тогда максимальное значение индукции, приводящее к полученному отклонению луча, будет:

$$|B_m| = \frac{C_2 r_2 U_r \cdot 10^8}{\omega_2 Q}. \quad (2)$$

Градуировку прибора по оси  $H$  при исследовании кольцевых образцов производят, подавая на вход канала  $H$  известное напряжение  $U_r$  и наблюдая отклонение луча по горизонтали  $x_r$  под действием этого напряжения. Максимальное значение напряженности поля, соответствующее данному отклонению луча, можно выразить в виде:

$$H_m = \frac{0,4\pi\omega_1 U_r}{r_0 l_{cp}}.$$

Принимая следующие величины относительных наибольших ошибок при определении отдельных величин:  $U_r = 1\%$ ;  $C_2 = 1\%$ ;  $r_2 = 1\%$ ;  $Q = 0,4\%$ ;  $r_0 = 1\%$ ;  $l_{cp} = 0,2\%$ ;  $x_r$  и  $y_r$  — 1,25%, получим наибольшую возможную приведенную погрешность при градуировке канала  $B$ :  $\gamma_{2B} = 1 + 1 + 1 + 0,4 + 1,25 \approx 5\%$  и градуировке канала  $H$ :  $\gamma_{2H} = 1 + 1 + 0,2 + 1,25 \approx 3,5\%$ . При определении абсолютных значений этим способом приведенная погрешность составит по каналу  $B$  примерно 6%, а по каналу  $H$  — 5%.

Таким образом, оба способа градуировки дают приблизительно одну и ту же степень погреш-

ности. Такой же порядок погрешности будет при проведении ряда контрольных измерений.

**Выводы.** Метод получения основной динамической кривой намагничивания, основанный на наблюдении всего нестационарного магнитного процесса намагничивания в координатах  $B$ , дает возможность получить на экране осциллографа (за 2 ... 3 сек) одновременно гнездовые динамических петель и основную динамическую кривую намагничивания. Метод позволяет получить объективную документацию в виде фотографий. Для сравнительно тонких образцов ферромагнетика могут применяться разные частоты возбуждения импульса. При испытании более толстых образцов следует применять более низкие частоты. Образцы, имеющие заметные потери на вихревые токи по сравнению с потерями на гистерезис, даже на низких частотах, измерению не подлежат. Возможность одновременного получения основной динамической кривой намагничивания и предельного гистерезисного цикла за 2 ... 3 сек позволяет значительно упростить процесс магнитных измерений и облегчить труд оператора. Если предельные петли материала в измеряемом диапазоне частот не расширяются и при этом вершины частных петель не закругляются, то динамические магнитные параметры материала с точностью до 5% будут равны соответствующим статическим параметрам.

**Приложение. Расчет измерительной цепи.** Расчет производится при условии обеспечения допустимой погрешности в измерении величины индукции  $B$ . На рис. 11 представлена эквивалентная схема измерительной цепи канала индукции  $B$ .

Коэффициент передачи такой схемы может быть представлен в следующем виде:

$$|k(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{r_2}{r_y} - \omega^2 LC_2\right)^2 + \omega^2 \left(\frac{L}{r_y} + r_2 C_2\right)^2}} \quad (1)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{\frac{\omega L}{r_y} + \omega r_2 C_2}{1 + \frac{r_2}{r_y} - \omega^2 LC_2}. \quad (2)$$

Полученные выражения можно упростить, так как  $\frac{L}{r_y} \ll r_2 C_2$ . Отсюда получим:

$$|k(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{r_2}{r_y} - \omega^2 LC_2\right)^2 + \omega^2 r_2^2 C_2^2}}. \quad (3)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{\omega r_2 C_2}{1 + \frac{r_2}{r_y} - \omega^2 LC_2}. \quad (4)$$

Будем определять фазные искажения, которые сильнее сказываются на точности измерения, чем частотные, принимая их за меру ошибки при реальном интегрировании схемы.

$L$  — коэффициент самоиндукции рассеяния;  $r_2$  и  $C_2$  — элементы интегрирующей цепи;  $r_y$  — нагрузочное сопротивление (активное сопротивление измерительной катушки входит в величину  $r_2$ ; сопротивление утечки конденсатора  $C_2$  входит в величину  $r_y$ ).

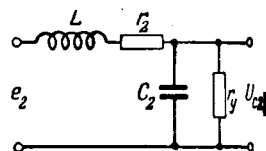


Рис. 11. Эквивалентная схема.

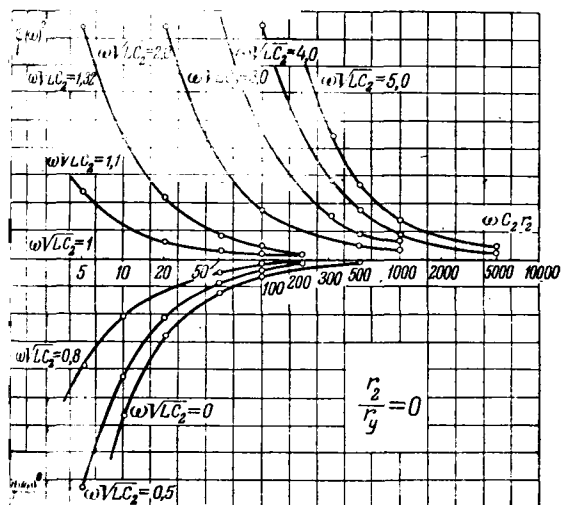


Рис. 12.

Отклонение фазного угла от  $\left(-\frac{\pi}{2}\right)$  характеризует фазной ошибки  $\phi(\omega)$ , который из (I,4) может быть введен следующим образом:

$$\phi(\omega) = -\arctg \frac{1 + \frac{r_2}{r_y} - \omega^2 LC_2}{\omega r_2 C_2}. \quad (I,5)$$

Можно заключить, что при  $1 + \frac{r_2}{r_y} = \omega^2 LC_2$  име- частоты, для которых угол фазной ошибки  $\phi(\omega)$  равен нулю, а по обе стороны от этого значения рты угол  $\phi(\omega)$  будет иметь разные знаки.

На рис. 12 дано семейство кривых  $\phi(\omega)$  в зависимо- ют  $\omega C_2 r_2$  при разных  $\omega \sqrt{LC_2}$ . Семейство построено одного из значений  $\frac{r_2}{r_y} = 0$ . С осью абсцисс совпадает ельная кривая, для которой  $\phi(\omega) = 0$ .

На рис. 13 приведена кривая  $|k(\omega)|$  для разных зна- ий  $\omega r_2 C_2$  и  $\omega \sqrt{LC_2}$  при  $\frac{r_2}{r_y} = 0$ . В пределах углов фаз- юшибки до  $5^\circ$  значение  $\omega r_2 C_2$  порядка 20 и поэтому, пересечуших нас пределах, выражение (I,3) перехо- в

$$|k(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(\omega^2 LC_2)^2 + (\omega r_2 C_2)^2}}. \quad (I,6)$$

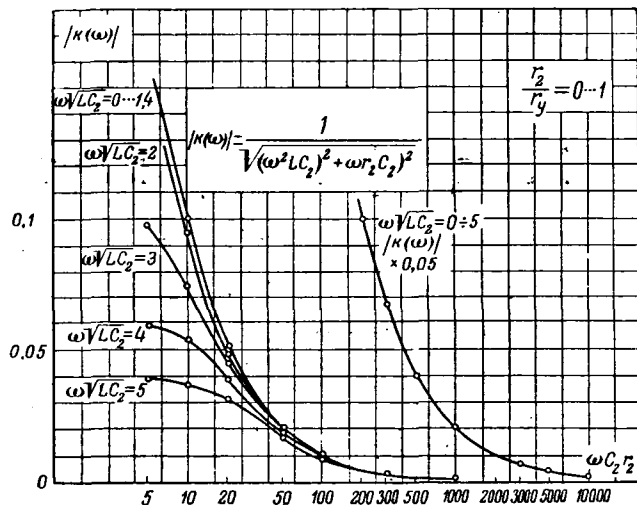


Рис. 13.

Максимальная ошибка при этом допущении будет, когда  $\omega \sqrt{LC_2} = 5$  и  $\frac{r_2}{r_y} = 1$  и составляет около 5%. Имея в ви- ду, что значение  $|k(\omega)|$  нужно лишь для ориентировки в-уровне выходного напряжения, можно считать ошибку в 5% вполне допустимой, и поэтому нецелесообразно строить семейства графиков для разных  $\frac{r_2}{r_y}$ .

### Литература

1. Л. С. Касаткин. Электрические измерения. Госэнергоиздат, 1945.
2. Курс под редакцией А. В. Фремке. Электриче-ские измерения, Госэнергоиздат, 1950.
3. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах. ОНТИ, 1935, 1936.
4. Т. Н. Long и Г. Д. Mc. Mullen. Прибор для снятия кривой В-Н магнитной проволоки. El. Eng., стр. 146, № 3, 1946.
5. D. E. Wiegand и W. W. Hansen. Прибор для снятия гистерезисных петель у материалов с низкой проницаемостью на 60 гц. Trans. AIEE, стр. 119, т. 66, 1947.
6. Л. А. Бессонов. Электрические цепи со сталью. Госэнергоиздат, 1948.
7. В. Г. Корольков. Магнитная запись звука. Госэнергоиздат, 1949.
8. В. П. Вологдин и М. А. Спицын. Генераторы высокой частоты. ОНТИ, 1935.

[31. 12. 1951]



# Классификация мостовых схем постоянного и переменного токов

Кандидат техн. наук И. Н. КРОТКОВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт им. Менделеева

## Постановка задачи.

Различные задачи в технике электрических измерений решаются путем применения мостовых схем. Ввиду большого раз-

нообразия таких схем целесообразно вновь рассмотреть вопрос их классификации и системы обозначений. В технической литературе известно несколько статей по данному вопросу [Л. 1, 5]. Эти работы, однако, не охватывают ряд мостов, получивших распространение (резонансные, с взаимной индуктивностью), и, кроме того, разделяют мосты на слишком большие группы.

**Некоторые общие сведения о мостовых измерительных схемах.** Будем рассматривать уравновешенные мосты, пренебрегая „остаточными“ действиями за счет различных паразитных связей между элементами схемы.

Если иметь в виду четырехплечие и четырехузловые мостовые схемы, или какие-либо другие,

Рассматриваются некоторые общие сведения о мостах, составленных из линейных элементов и используемых для измерения параметров электрических цепей ( $R, L, M, C$ ). Приводится новая классификация и система обозначений этих схем, позволяющая производить их анализ.

В зависимости от способа соединений отдельных плеч мосты можно разделить: Х-образные (скрещенные) и Т-образные (рис. 1 и 2).

Если прибор (указатель), который используется для регистрации момента равновесия схем включен непосредственно на выходные зажимы моста, то для тока, протекающего по его обмоткам  $I_y$ , будет справедливо:

$$I_y = \frac{\dot{E}}{Z_{zy}} = \dot{E} \frac{\alpha}{\beta},$$

где  $Z_{zy}$  — взаимное сопротивление между цепью генератора и указателя. В момент равновесия:

$$Z_{zy} = \frac{\beta}{\alpha} = \infty.$$

Воспользовавшись [Л. 4] коэффициентами обобщенной матрицы  $D$  указанных выше четырехполюсников (рис. 1 и 2), не представляет труда показать, что  $\alpha$  и  $\beta$  (1) будут иметь значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Тип мостов	Т-образные мосты	Х-образные мосты
$\alpha$	$Z_1 Z_2 + Z_3 (Z_1 + Z_2 + Z_4)$	$Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3$
$\beta$	$(Z_1 + Z_2 + Z_4) \gamma$	$(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) \gamma$

Здесь обозначено:

$$\gamma = [Z_2 + (Z_{22})_{\infty}] [Z_y + Z_{yy}],$$

где  $(Z_{22})_{\infty}$  — входное сопротивление четырехполюсника со стороны генератора, считая  $Z_y = \infty$ ;  $Z_{yy}$  — входное сопротивление четырехполюсника со стороны прибора (указателя).

Аналогично легко вычислить [Л. 2, 3]:

$$Z_{22} = \frac{D_{12} + D_{11} Z_y}{D_{22} + D_{21} Z_y},$$

$$Z_{yy} = \frac{D_{12} + D_{11} Z_2}{D_{22} + D_{21} Z_2},$$

$$Z_{zy} = D_{12} + D_{21} Z_2 Z_y + D_{11} Z_y + D_{22} Z_2 = D_{21} \gamma.$$

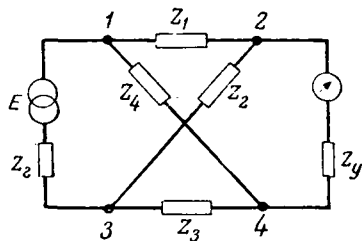


Рис. 1. Х-образный (скрещенный) мост.

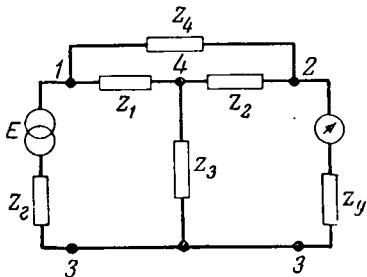


Рис. 2. Т-образный мост.

более сложные, но приведенные к этой форме путем эквивалентных преобразований, то для дальнейших расчетов достаточно пользоваться четырехполюсником, нагруженным сопротивлением  $Z_y$  (прибор) и получающим энергию только от источника с э. д. с.  $E$  и сопротивлением  $Z_2$  [Л. 3].

В соответствии с определением [Л. 2, 3], деля уравнению (2) и принимая также во внимание, что  $\beta \neq \infty$ , можно показать, что при равновесии моста

$$\alpha = 0. \quad (2a)$$

В комплексной плоскости:

$$(\alpha)_d = 0; (\alpha)_m = 0. \quad (2b)$$

Выражение (2b) удовлетворяется при изменении по крайней мере двух параметров электрических цепей мостовой схемы.

Условие равновесия мостовой схемы (2a) не зависит от перемены местами генератора и указателя. Однако при этом происходит изменение полных сопротивлений четырехполюсника (3), что может иметь существенное значение для точной согласования работы установки. В дальнейшем ограничимся рассмотрением нашедших, как известно, наибольшее распространение Х-образных мостов, приводя их к четырехплечному и четырехузловому виду.

Приведение сложных мостовых схем к четырехплечному и четырехузловому виду не представляет затруднений при использовании общепринятых формул эквивалентных преобразований, даже и в том частном случае, когда отдельные плечи моста имеют индуктивную связь.

Рассмотрим плечи моста по их назначению. Одно плечо  $Z_x$  обычно содержит неизвестные параметры, а остальные три плеча составлены из известных элементов. Заметим, что эти "образцовые" плечи имеют различную значимость как в смысле достижения момента равновесия моста, так и в конструктивном оформлении установки. Из образцовых элементов моста будем выделять "основным образцом"  $Z_0$ , выбирая его элементы соответственно параметрам измеряемого объекта  $Z_x$ . Основным образцом  $Z_0$  является наиболее хорошо изученным в отношении влияния различных внешних факторов и часто используется в качестве плавного переменного элемента, необходимый для достижения состояния равновесия моста. В остальных образцовых элементах моста  $Z_d$ ,  $Z_{d+1}$  или  $Z_{d+2}$  назовем элементами "диапазона".

Они обычно выполняются в виде постоянных или ступенчатых ступенями сопротивлений. При правильно рассчитанной мостовой схеме элементы "диапазона" могут сохраняться постоянными в определенных пределах изменения измеряемой величины  $Z_x$ . Активное сопротивление  $R_x$  неизвестного плеча  $Z_x$  во многих случаях принимают омическому и измеряют только на постоянном токе. Исключения составляют цепи с конденсаторами, омическое сопротивление которых достаточно трудно измерить на постоянном токе. Поэтому здесь, на переменном токе, появляется дополнительный объект измерения — "угол потерь". В дальнейшем, рассматривая мосты переменного тока и имея в виду назначение схемы,

будем выделять и называть "основным" тот из параметров  $L, M, C$ , который является объектом измерения.

**Классификация мостовых схем.** Как известно [Л. 5], в зависимости от способа расположения образцовых элементов, мостовые схемы разделяют на 2 группы: 1) "мосты отношения" (рис. 3), 2) "мосты произведения" (рис. 4).

В первой группе мостов, основные — образцовый и измеряемый элементы, находятся в смежных плечах. Для расчетов имеет значение отношение полных сопротивлений элементов диапазона:

$$\frac{Z_{d+1}}{Z_d} = A + jB = \left| \frac{Z_{d+1}}{Z_d} \right| e^{j[\varphi_{d+1} - \varphi_d]} = \left| \frac{Z_{d+1}}{Z_d} \right| e^{j\theta_d}.$$

Соответственно во второй группе мостов произведения образцовый и измеряемый элементы находятся в противоположащих плечах.

Здесь следует знать:

$$\begin{aligned} Z_d Z_{d+2} &= \Gamma + j\Delta = \left| Z_d Z_{d+2} \right| e^{j[\varphi_d + \varphi_{d+2}]} = \\ &= \left| Z_d Z_{d+2} \right| e^{j\lambda_d}. \end{aligned}$$

Такое разделение мостов является слишком общим и его необходимо продолжить, учитывая способы соединения параметров электрических цепей в плечах  $Z_x$  и  $Z_0$ . Тогда мостовые схемы можно разбить на 10 основных групп, как это указано в табл. 2 и 3. В таблицах приведены основные расчетные зависимости между параметрами

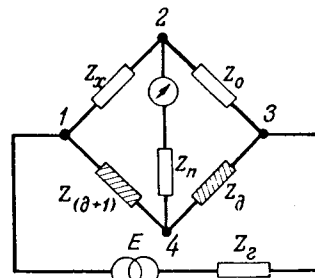


Рис. 3. Х-образный мост отношения.

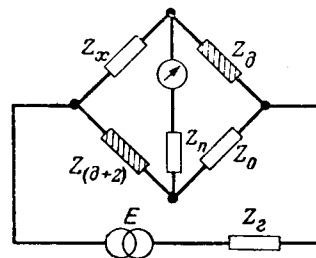


Рис. 4. Х-образный мост произведения.

рами моста, являющиеся следствием условия равновесия схемы 2.

В процессе анализа заданной мостовой схемы (приложение) достаточно привести ее к одному из видов, указанных в табл. 2 и 3.

Индексом  $d$  обозначена действительная часть, индексом  $m$  — мнимая.

Зависимости  $(\alpha)_\partial$  и  $(\alpha)_\Delta$  для мостов отношения

Таблица 2

Способ соединения $Z_x$ и $Z_\partial$		Одинаковый способ соединения $Z_0$ и $Z_x$		Различный способ соединения $Z_0$ и $Z_x$			
		$\alpha$ последовательное последовательное	$\beta$ параллельное параллельное	$\gamma$ последовательное параллельное	$\varepsilon$ параллельное последовательное	$\partial$ последовательное последовательно-параллельное	
Вид плеч отношения	$\frac{Z_{\partial+1}}{Z_\partial}$						
	$A + jB = \sqrt{A^2 + B^2} e^{j\vartheta_\partial}$	$\frac{R_x}{R_0}$	$A\theta_R$	$\frac{A}{\theta_R \cos^2 \vartheta_\partial}$	$A\theta_R \cos^2 \varphi_0$	$\frac{A}{\theta_R^* \cos^2 \varphi_0 \cos^2 \vartheta_\partial}$	$\frac{A\theta_R \cos^2 \varphi_0}{1 + \cos^2 \delta(r_0, x_0) \frac{\operatorname{tg} \delta(r_0, x_0)}{\operatorname{tg} \delta(R_0    x_0)}}$
	$\vartheta_\partial = \varphi_{\partial+1} - \varphi_\partial$	$\frac{X_x}{X_0}$	$A\theta_X$	$\frac{A}{\theta_X \cos^2 \vartheta_\partial}$	$A\theta_X \sin^2 \varphi_0$	$\frac{A}{\theta_X \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \vartheta_\partial}$	$\frac{A\theta_X \sin^2 \varphi_0}{\cos^2 \delta(r_0, x_0)}$
	$A + j0 = Ae^{j0}$	$\frac{R_x}{R_0}$	$A$	$A$	$A \cos^2 \varphi_0$	$\frac{A}{\cos^2 \varphi_0}$	$\frac{A \cos^2 \varphi_0}{1 + \cos^2 \delta(r_0, x_0) \frac{\operatorname{tg} \delta(r_0, x_0)}{\operatorname{tg} \delta(R_0    x_0)}}$
	$\vartheta_\partial = 0$	$\frac{X_x}{X_0}$	$A$	$A$	$A \sin^2 \varphi_0$	$\frac{A}{\sin^2 \varphi_0}$	$\frac{A \sin^2 \varphi_0}{\cos^2 \delta(r_0, x_0)}$

Вид плеч "произведения"	Вид мостовой схемы	Вид плеч				Вид плеч		Вид плеч "произведения"
		а	б	в	г	д	е	
		последовательное последовательное	параллельное параллельное	последовательное параллельное	параллельное последовательное	последовательное последовательно-параллельное		
$Z_\partial Z_{\partial+2}$	Вид мостовой схемы							
$\Gamma + j\Lambda = \sqrt{\Gamma^2 + \Delta^2} e^{j\lambda_\partial}$	$R_x R_0$	$\Gamma \theta_R \cos^2 \varphi_0$	$\frac{\Gamma}{\theta_R \cos^2 \varphi_0 \cos^2 \lambda_\partial}$	$\Gamma \theta_R$	$\frac{\Gamma}{\theta_R \cos^2 \lambda_\partial}$	$\Gamma \theta_R \left[ 1 + \cos^2 \delta(r_0, x_0) \frac{\operatorname{tg} \delta(r_0, x_0)}{\operatorname{tg} \delta(R_0    x_0)} \right]$		
$\lambda_\partial = \varphi_{\partial+2} + \varphi_\partial$	$X_x X_0$	$\Gamma \theta_x \sin^2 \varphi_0$	$\frac{\Gamma}{\theta_x \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \lambda_\partial}$	$\Gamma \theta_x$	$\frac{\Gamma}{\theta_x \cos^2 \lambda_\partial}$	$\Gamma \theta_x \cos^2 \delta(r_0, x_0)$		
$\Gamma + j0 = \Gamma e^{j0}$	$R_x R_0$	$\Gamma \cos^2 \varphi_0$	$\frac{\Gamma}{\cos^2 \varphi_0}$	$\Gamma$	$\Gamma$	$\Gamma \left[ 1 + \cos^2 \delta(r_0, x_0) \frac{\operatorname{tg} \delta(r_0, x_0)}{\operatorname{tg} \delta(R_0    x_0)} \right]$		
$\lambda_\partial = 0$	$X_x X_0$	$\Gamma \sin^2 \varphi_0$	$\frac{\Gamma}{\sin^2 \varphi_0}$	$\Gamma$	$\Gamma$	$\Gamma \cos^2 \delta(r_0, x_0)$		

Для сокращения записей в табл. 2 и 3 обозначено:

Символ Мост	$\theta_R$	$\theta_x$
Отношения . . .	$1 - \operatorname{tg} \varphi_0 \operatorname{tg} \theta_0$	$1 + \operatorname{ctg} \varphi_0 \operatorname{tg} \theta_0$
Произведения . .	$1 - \operatorname{tg} \varphi_0 \operatorname{tg} \lambda_0$	$1 + \operatorname{ctg} \varphi_0 \operatorname{tg} \lambda_0$

Кроме того, обозначено:  $\delta(r_0, x_0)$  — угол потерь плеча, если оно составлено из последовательно соединенных сопротивлений  $r_0, x_0$ ;  $\delta(R_0 \| X_0)$  — угол потерь того же плеча, если оно составлено из параллельно соединенных  $R_0, X_0$ .

Как следует из этих таблиц, для любых мостовых схем будет справедливо: — мосты отношения

$$\frac{R_x}{R_0} = A_{v_1}(Z) \text{ и } \frac{X_x}{X_0} = A_{v_2}(Z); \quad (4)$$

мосты произведения

$$R_x R_0 = \Gamma \psi_1(Z); \quad X_x X_0 = \Gamma \psi_2(Z), \quad (5)$$

где  $v_i(Z)$  и  $\psi_i(Z)$  — функции параметров отдельных плеч моста.

Введем новый параметр  $W_i$ , который может принимать значения какого-либо из элементов электрической цепи ( $L, M, C$ ).

Тогда соотношения (4) и (5) переписутся:

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{R_x}{R_0} \right) \cdot \frac{1}{A} &= v_1(Z), \\ \left( \frac{W_x}{W_0} \right) \frac{1}{A} &= v_2(Z) \text{ при } Z_x = \omega W_x, \\ \left( \frac{W_x}{W_0} \right) A &= \frac{1}{v_2(Z)} \text{ при } Z_x = \frac{1}{\omega W_x}; \end{aligned} \right\} \quad (4a)$$

$$\left. \begin{aligned} (R_x R_0) \frac{1}{\Gamma} &= \psi_1(Z), \\ \left( W_x \frac{1}{W_0} \right) \frac{1}{\Gamma} &= \psi_2(Z) \text{ при } Z_x = \omega W_x, \\ \left( W_x \frac{1}{W_0} \right) \Gamma &= \frac{1}{\psi_2(Z)} \text{ при } Z_x = \frac{1}{\omega W_x}. \end{aligned} \right\} \quad (5a)$$

Заметим, что правые части уравнений (4a) и (5a) могут быть преобразованы к виду

$$v_i(Z) = 1 \pm \sigma_i; \text{ и } \psi_i(Z) = 1 \pm \tau_i,$$

где  $\sigma_i$  и  $\tau_i$  — безразмерные величины, определяющие степень сложности мостовой схемы.

Левые части уравнений (4a) и (5a) содержат все основные элементы моста, определяя характер их размещения в пределах схемы.

Указанное выше разделение мостов все же еще является недостаточно определенным. В пределах каждого из упомянутых видов схем можно найти мосты, различные по элементам и эксплуатационным свойствам, но удовлетворяющие одинаковым признакам классификации. Введем дополнительную классификацию мостов, учитывая принцип действия моста: вид и назначение всех элементов, составляющих схему, пределы измерений и класс точности.

Рассматривая мосты по принципу действия будем разделять их по системам.

Наименование системы определяется видом основного измеряемого параметра  $W_x$ , соотношения  $Z_x$  и видом основного образцового параметра  $W_0$ , сопротивления  $Z_0$ .

В табл. 4 предлагаются наименования систем мостов.

В пределах одной и той же „системы“ могут находиться различные мостовые схемы, отличающиеся друг от друга элементами диапозона. Поэтому каждому виду такой схемы дополнительно присваивается особое условное обозначение, учитывающее вид элементов диапозона.

Для установления системы условных обозначений мостовых схем воспользуемся частями (4a) и (5a). Тогда мосты отношения (рис. 3) будем условно обозначать в виде отношения. Числитель отношения указывает на основную величины, подлежащей измерению. Знаменатель определяет выбранную основную разовую величину. Все выражение помещается в скобку и умножается на новую „дробь“, подобным образом определяющую вид элементов диапозона.

Мосты произведения (рис. 4) будем условно обозначать в виде произведения. Первый из множителей этого произведения указывает на вид измеряемой величины в том смысле, как это отмечалось выше. Второй член произведения аналогично определяет образцовую величину. Все выражение помещается в скобку и вновь умножается на произведение, указывающее вид элементов диапозона.

Заметим, что числитель и знаменатель условного обозначения моста отношения составлены из параметров электрических цепей, образующих реактивные сопротивления одного знака.

Сомножители условного обозначения моста произведения составятся из параметров электрических цепей, образующих реактивные сопротивления разных знаков.

Все отмеченное дает возможность сразу же определить вид моста и его расчетную формулу, имея соответствующее условное обозначение. Исключение составляют редко встречающиеся сложные мостовые схемы, для которых, пользуясь методом эквивалентных преобразований, следует предварительно вычислить  $\sigma_i$  и  $\tau_i$ . Следует принять во внимание, что значения этих коэффициентов могут быть табулированы (табл. 5).

В пределах каждой из упомянутых систем возможна различная комбинация включения элементов плеч моста  $R, X$ . Поэтому в дальнейшем (табл. 5) отдельные схемы обозначаются по способу соединения элементов плеч  $R, X$  и разделяются на простые (последовательные, параллельные) и сложные (смешанные).

Каждому соединению элементов плеч присваивается (табл. 5) соответствующее условное обозначение, пользуясь следующими положениями.

Последовательное соединение параметров условно обозначается соответствующим

Таблица 4

1 2	Наименование системы	Вид основных параметров моста $W_x$ и $W_0$	Условное обозначение моста данной системы
МОСТЫ И ОТНОШЕНИЯ	Омическая	$R_x$ и $R_0$	$\left(\frac{R}{R}\right) \frac{1}{R}$ или $(RR) RR$
	Резонансная	$L_x$ и $\omega_0$ , $C_0$ $C_x$ и $\omega_0$ , $L_0$ $\omega_x$ и $L_0$ , $C_0$	$\left(\frac{\omega L}{1}\right) \frac{1}{\left(\frac{R}{R}\right)^0}$ или $\left(\frac{1}{\omega C}\right) \frac{1}{\left(\frac{R}{R}\right)^0}$
	Индуктивная	$L_x$ и $L_0$	$\left(\frac{L}{L}\right) \frac{1}{R}; \left(\frac{L}{L}\right) \frac{1}{L}; \left(\frac{L}{L}\right) \frac{C}{C}$
	Емкостная	$C_x$ и $C_0$	$\left(\frac{C}{C}\right) \frac{R}{R}; \left(\frac{C}{C}\right) \frac{1}{C}; \left(\frac{C}{C}\right) \frac{L}{L}$
	Взаимоиндуктивная	$M_x$ и $M_0$ $L_x$ и $M_0$	$\left(\frac{M}{M}\right) \frac{1}{R}; \left(\frac{L}{M}\right) \frac{1}{R}$
ПРОИЗВЕДЕНИЯ	Индуктивно-емкостная	$L_x$ и $C_0$ $C_x$ и $L_0$	$\left(L \frac{1}{C}\right) \frac{1}{RR}; \left(C \frac{1}{L}\right) RR$
	Взаимоиндуктивно-емкостная	$M_x$ и $C_0$ $C_x$ и $M_0$	$\left(M \frac{1}{C}\right) \frac{1}{RR}; \left(C \frac{1}{M}\right) RR$

буквами, отделенными запятой (например  $R_n, C_n$ , если эти параметры переменны).

Параллельное соединение обозначается цветствующими буквами и знаком параллельности (например  $C \parallel R$ ).

Смешанное, например: последовательно-параллельное соединение обозначается так:  $C, R \parallel R$  (табл. 5, схема 18).

Можно сразу подобрать условное обозначение для заданной сложной мостовой схемы, не образуя ее в эквивалентную четырехплечную и трехузловую. Попрежнему обозначаем:  $I, 2$  — узловые точки моста и  $I, II, III, IV$  — плечей моста, считая, что между узлами  $I, 3$  всегда находится генератор, между узлами  $2, 4$  — указатель, цепи которых дополнительно обозначим:  $VI$ .

В тех случаях, когда схема является сложной, добавляются дополнительные узлы, а в условном обозначении указываются цифры со штрихом. Например, узлы  $3$  и  $3'$  показывают, что между четырехплечной мостовой схемой ( $I, 2, 3, 4$ ) находится еще дополнительный элемент, расположенный между узлами  $3$  и  $3'$  (табл. 5, схема 12).

Таким образом, можно видеть (табл. 5), что условное обозначение схемы включает все составляющие ее элементы в том виде, как они фактически собраны. Это обстоятельство дает возможность сразу судить о схеме и указывать на параметр, являющийся в процессе уравнивания переменным, изображая его с индексом  $n$ .

Наконец, для определения пределов измерения моста условное обозначение системы дополняется указанием верхних и нижних числовых значений, определяющих величину диапазона.

Укажем еще на возможность разделения мостов по классам точности в зависимости от величины параметра

$$K_m = \lg \frac{\epsilon}{\epsilon_0},$$

где  $\epsilon$  — наибольшая погрешность определения действительных значений образцовых элементов данного моста;  $\epsilon_0$  — то же, но при наилучшем изготовлении и проверке их по высшему классу точности.

Отсюда для мостов высшего класса точности будет:

$$K_m = \lg 1 = 0.$$



Новая классификация мостов по системам и схемам соединения элементов

Система Схема		Омическая $\left(\frac{R}{R}\right) \cdot \frac{R}{R}$	Резонансная $\left(\frac{\omega L}{\frac{1}{\omega C}}\right) \cdot (A)^0$	Индуктивная $\left(\frac{L}{L}\right) \cdot \frac{1}{A}$	Емкостная $\left(\frac{C}{C}\right) A$	Взаимоиндук- тивная $\left(\frac{L}{M}\right) \cdot \frac{1}{A}$	Индуктивно- емкостная $\left(L \times \frac{1}{C}\right) \cdot \frac{1}{A}$	Емкостно- индуктивная $\left(C \times \frac{1}{L}\right) A$
Одинаковый способ соединения $Z_0$ и $Z_x$	$\frac{Z_{\partial+1}}{Z_{\partial}}$ или $\frac{Z_{\partial}}{Z_{\partial+1}}$	$\frac{R_x}{R_0} \cdot \frac{R}{R}$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$
	$\frac{Z_{\partial+1}}{Z_{\partial}}$	$\left(\frac{R_x}{R_0}\right) \cdot \frac{R}{R}$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$
Различный способ соединения $Z_0$ и $Z_x$	$\frac{Z_{\partial+1}}{Z_{\partial}}$	$\left(\frac{R_x}{R_0}\right) \cdot \frac{R}{R}$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$
	$\frac{Z_{\partial}}{Z_{\partial+1}}$	$\left(\frac{R_x}{R_0}\right) \cdot \frac{R}{R}$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$	$\left(\frac{L_x}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{R}$	$\left(\frac{C_x}{C_0}\right) \cdot R$

**Закключение.** Разработанный способ условных обозначений мостовых схем дает возможность значительно упростить процесс вычисления уравнений равновесия (26) и определить основные характеристики моста. В дальнейшем возможно применение параллельных классификаций на основе дополнительных, пока еще недостаточно четко сформулированных свойств мостовых схем. Вопрос о разделении мостов по классу точности связан с методикой измерения параметров электрических цепей и должен разрешаться самостоятельно.

**Приложение.** Рассмотрим пример на применение новой классификации и способа условных обозначений к исследованию X-образных мостовых схем.

**Пример.** Определить вид схемы и основную характеристику моста системы  $\left(\frac{C}{C}\right) \frac{R}{R}$ , собранного по схеме

$$\left(\frac{C, R}{C_n, R}\right) \frac{R}{R \parallel C_n} \Big|_{100 \text{ пф}}^{1 \text{ мкф}}$$

**Решение.** Искомая схема является простым мостом отношения, при одинаковом (последовательном) способе соединения параметров плеч  $Z_x$  и  $Z_0$ . В качестве элементов диапазона применены два сопротивления, из которых одно (противоположное  $Z_x$ ) шунтировано емкостью. Схема уравнивается изменением двух емкостей

$C_0$  и  $C_{\partial}$ . Схема предназначена для измерения конденсаторов от 100 пф до 1 мкф.

Мост следует искать в табл. 2 (схема вида а), этому здесь:

$$\frac{R_x}{R_0} = A \theta_R \text{ и } \frac{X_x}{X_0} = A \theta_x.$$

Согласно схеме:

$$\frac{Z_{\partial+1}}{Z_{\partial}} = A + jB, \text{ где } A = \frac{R_{\partial+1}}{R_{\partial}}.$$

Мост принадлежит к емкостной системе (табл. 2, схема 2) и в литературе называется схемой Шерера. В соответствии с принятыми обозначениями можем записать:

$$\frac{R_x}{R_0} = A (1 + \operatorname{tg} \varphi_0 \operatorname{tg} \varphi_{\partial});$$

$$\frac{X_x}{X_0} = A (1 - \operatorname{ctg} \varphi_0 \operatorname{tg} \varphi_{\partial}).$$

Если считать, что сопротивления  $R_x$  и  $R_0$  определяют потери в конденсаторах  $C_x$  и  $C_0$ , то:

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{\operatorname{tg} \delta_x}{\omega C_x R_0} = A (1 + \operatorname{tg} \varphi_0 \operatorname{tg} \varphi_{\partial}),$$

$$\frac{X_x}{X_0} = A (1 - \operatorname{ctg} \varphi_0 \operatorname{tg} \varphi_{\partial})$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = A \omega C_x R_0 \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \delta_0}{\operatorname{tg} \delta_0} \right),$$

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{1}{A} \frac{1}{1 - \operatorname{tg} \delta_0 \operatorname{tg} \delta_0},$$

$$\sigma_R = \frac{\operatorname{tg} \delta_0}{\operatorname{tg} \delta_0} \text{ и } \sigma_c = -\operatorname{tg} \delta_0 \operatorname{tg} \delta_0.$$

Взяв при вычислении угла потерь  $A \approx \frac{C_0}{C_x}$ , окончательно:

$$\operatorname{tg} \delta_x \approx \operatorname{tg} \delta_0 + \operatorname{tg} \varphi_0 = \operatorname{tg} \delta_2 + \operatorname{tg} \varphi_3;$$

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{\frac{R_0}{R_0+1}}{1 - \operatorname{tg} \delta_0 \operatorname{tg} \varphi_0} = \frac{\frac{R_3}{R_4}}{1 - \operatorname{tg} \delta_2 \operatorname{tg} \varphi_3}.$$

Отсюда видно, что при указанном способе регулирования равновесия схемы, уравнения (6) будут независимы друг от друга при:

$$\operatorname{tg} \delta_2 = 0; (\sigma_c = 0).$$

◇ ◇ ◇

## Частотная компенсация вольтметров переменного тока

Доктор техн. наук, проф. В. Н. МИЛЬШТЕЙН

Московский государственный институт мер и измерительных приборов

Широкое применение измерительных приборов переменного тока в современной технике привлекает внимание приборостроителей к возможности увеличения частотного диапазона использования измерительных приборов электромагнитной и электродинамической систем.

Задача рационального выбора параметров вольтметра переменного тока, предназначенного для применения в широком диапазоне частот, может быть сформулирована следующим образом. В распоряжении конструктора имеется механизм прибора электромагнитной или электродинамической системы. Требуется построить вольтметр достаточно низкого предела измерения с некоторым заданным потреблением по току для измерения переменных напряжений, частота которых  $\omega$  может изменяться в диапазоне от 0 до  $\omega_{\max}$ , причем наибольшая частотная погрешность на этом диапазоне не должна превышать некоторой величины  $\Delta$ .

Известно, что эффективным мероприятием для расширения частотного диапазона применения вольтметра является включение в схему конденсатора  $C$  (рис. 1) для осуществления частотной компенсации. Несмотря на широкое распространение этой схемы, рекомендуемые в литературе формулы для определения ее параметров неверны.

Устанавливаются условия, при выполнении которых погрешность вольтметра переменного тока при изменении частоты измеряемого напряжения в некотором заданном интервале 0,  $\omega_{\max}$  минимальна по П. Л. Чебышеву. Расчетные формулы, дают возможность оптимального выбора параметров схемы вольтметра, предназначенного для использования в широком диапазоне частот.

Вследствие этого отсутствует оценка частотной погрешности схемы с рационально выбранными параметрами и, таким образом, преимущества схемы с частотной компенсацией количественно

не могут быть определены. Цель настоящей работы — устранение этого пробела. Для формулирования метода рационального выбора параметров схемы рис. 1 необходимо иметь в виду условия градуировки вольтметра.

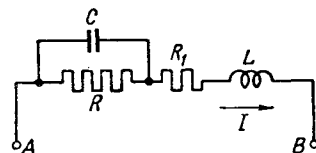


Рис. 1.

Возможны два случая: а) градуировка вольтметра производится на постоянном токе и деления на шкале наносятся без какого бы то ни было корректирования; б) градуировка вольтметра производится на постоянном токе, но деления на шкале наносятся с некоторым сдвигом, обеспечивающим сведение к минимуму частотной погрешности, что эквивалентно градуировке без

По этой причине, а также для устранения влияния паразитов, мосты класса 0 ( $K_M = 0$ ) данной системы используются при измерениях по способу замещения.

### Литература

1. К. Б. Карандеев и З. И. Зеликовский. Мостовые измерительные схемы. Электричество, № 6, 1951.
2. И. Н. Кротков. Чувствительность электрических измерительных цепей. Электричество, № 10, 1949.
3. И. Н. Кротков. Расчет наибольшей чувствительности электрических измерительных цепей. Электричество, № 10, 1951.
4. М. А. Бонч-Бруевич. Основы радиотехники. Связьрадиоиздат, ч. I, 1938.
5. Д. Т. Фергюссон. Классификация методов измерения полного сопротивления при помощи мостовых схем. Bell. Syst. Techn. Journal, т. 12, стр. 452, 1933.

[24. 5. 1952]

сдвига на переменном токе определенным образом выбранной частоты.

Для обоих случаев можно сформулировать общее условие выбора оптимального значения величины компенсирующей емкости  $C$ . Величина  $C$  должна быть такой, чтобы наибольшее уклонение функции  $Z^2 = F(\omega^2)$  на интервале  $0 < \omega < \omega_m$  от некоторой постоянной величины  $k$  было минимальным. Таким образом, математически наша задача сводится к определению функций, наименее уклоняющихся от нуля, в смысле П. А. Чебышева (приложение).

**Влияние величины компенсирующей емкости  $C$  на зависимость относительного изменения тока  $I$  от частоты:**  $\gamma_0(\omega) = \frac{I(0) - I(\omega)}{|I(0)|}$

$$|I(\omega)| = \frac{U}{|Z(\omega)|},$$

где

$$|Z(\omega)| = \sqrt{\left[R_1 + \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2}\right]^2 + \omega^2 C^2 R^2 \left[\frac{L}{CR} - \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2}\right]^2}. \quad (1)$$

Если градуировка вольтметра осуществляется на постоянном токе, как это обычно имеет место на практике, то относительное изменение тока  $I$  (при измерении напряжения частот  $\omega$ ) определяется как:

$$\begin{aligned} \gamma_0(\omega) &= - \frac{|I(\omega)| - |I(0)|}{|I(0)|} \approx - \frac{|Z(\omega)| - |Z(0)|}{|Z(0)|} \approx \\ &\approx \frac{1}{2} \frac{|Z(\omega)|^2 - |Z(0)|^2}{|Z(0)|^2} \end{aligned} \quad (2)$$

при условии  $|Z(\omega)| - |Z(0)| \ll |Z(0)|$ .

Будем считать, что схема вольтметра (рис. 1) предназначена для измерения синусоидальных напряжений, частота которых лежит в диапазоне от  $\omega=0$  до  $\omega=\omega_m$ .

Обозначим:

$$\frac{2\omega^2}{\omega_m^2} = 1 + x,$$

где изменению  $\omega$  от 0 до  $\omega_m$  соответствует изменение  $x$  от  $-1$  до  $+1$ ;

$$\left. \begin{aligned} \gamma_0(\omega) &= \gamma(x); \quad 1 + 2 \frac{R_1}{R} = A; \\ \frac{\omega_m L}{R} &= Q; \quad \frac{L}{CR^2} = \beta; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$\Delta$  — частотная погрешность вольтметра.

На основании (1), (2) и (3) получаем после преобразований:

$$\gamma(x) = \frac{1}{(A+1)^2} (1+x) Q^2 \left[ 1 - 2 \frac{2\beta + A}{2\beta^2 + Q^2(1+x)} \right]. \quad (4)$$

С точки зрения задач настоящей работы интересуют следующие вопросы.

1. Имеет ли функция  $\gamma(x)$  экстремумы, каковы условия для их существования в данном частотном интервале, каково максимальное число экстремальных точек на интервале, при каких значениях компенсирующей емкости  $C$  имеют место экстремумы.

2. Зависимость экстремальных значений функции от величины емкости  $C$ .

3. Зависимость значения функции на верхней границе интервала (при  $x=1$ ) от величины компенсирующей емкости  $C$ .

4. Значение величины  $\beta = \beta_3$ , при котором  $\gamma(1) = 0$ .

1. Из условия  $\frac{d\gamma(x)}{dx} = 0$  и последующего деления знака второй производной, приходим

к выводу, что функция имеет один минимум при значении  $x$ , определяемом формулой:

$$(1+x)_{\text{экстр}} = \frac{2\beta}{Q^2} [V 2\beta + A - \beta].$$

Экстремум имеет место внутри интересующего нас интервала при выполнении условия:

$$0 \leq \frac{2\beta}{Q^2} [V 2\beta + A - \beta] \leq 2.$$

Предельными случаями являются:

а) случай

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\beta_1}{Q^2} [V 2\beta_1 + A - \beta_1] &= 0, \\ \beta_1 &= 1 + V A + 1. \end{aligned} \right\}$$

Экстремум достигается при  $x = -1$  (при  $\omega = 0$ ), т. е. в точке, где  $\gamma(x) = \gamma(-1) = 0$ ;

б) случай, когда экстремум находится на верхней границе частотного интервала (при  $x = 1$  или  $\omega = \omega_m$ ). Соответствующее значение  $\beta$  определяется равенством

$$\frac{2\beta_2}{Q^2} [V 2\beta_2 + A - \beta_2] = 2 \quad \text{или} \quad V 2\beta_2 + A = \frac{\beta_2^2 + 1}{\beta_2}$$

$\beta_2$  проще всего найти графическим путем — абсциссу точек пересечения кривой  $V 2\beta + A = f(\beta)$  с кривыми  $\frac{\beta^2 + 1}{\beta} = \varphi(\beta)$  (рис. 2).

Как это видно из рис. 2, при больших значениях  $Q$  кривые не пересекаются — точка минимума при любых значениях  $\beta$  остается вне диапазона. При малых  $Q$  точка минимума дв...

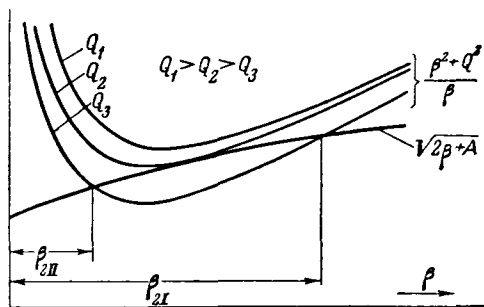


Рис. 2.

зывается на верхней границе диапазона. Это означает, что при уменьшении  $\beta$  она выходит за пределы диапазона, а затем снова входит в него.

2. Подставляя (5) в (4), получаем:

$$\gamma(x_{\text{экстр}}) = -\frac{2}{(A+1)^2} [V\sqrt{2\beta + A} - \beta]^2. \quad (9)$$

Абсолютное значение  $|\gamma(x_{\text{экстр}})|$  уменьшается с увеличением  $\beta$  (с уменьшением  $C$ ).

Действительно,

$$\frac{d|\gamma(x_{\text{экстр}})|}{d\beta} = \frac{4}{(A+1)^2} [V\sqrt{2\beta + A} - \beta] \times$$

$$\times \left[ \frac{1}{V\sqrt{2\beta + A}} - 1 \right],$$

$$[V\sqrt{2\beta + A} - \beta] \equiv (1+x)_{\text{экстр}} > 0,$$

$$\left[ \frac{1}{V\sqrt{2\beta + A}} - 1 \right] < 0, \text{ так как } A \geq 1 \text{ и } \beta > 0,$$

куда

$$\frac{d|\gamma(x_{\text{экстр}})|}{d\beta} < 0.$$

3. Для определения значения  $\gamma(x)$  на верхней границе интервала подставим в выражение (4) значение  $x=1$

$$\gamma(1) = \frac{2}{(A+1)^2} Q^2 \left[ 1 - \frac{2\beta + A}{\beta^2 + Q^2} \right], \quad (10)$$

имеет один минимум при

$$\beta = \beta_a = \frac{A}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{2Q}{A} \right)^2} - 1 \right]. \quad (10a)$$

Следовательно, при  $\beta > \beta_a$  увеличение  $\beta$  вызывает рост  $\gamma(1)$ , а при  $\beta < \beta_a$  — падение.

4. Значения  $\beta$  и  $C$ , при которых  $\gamma(1)=0$ , будем, приравнявая (10) нулю:

1. При  $Q^2 < A$  соответствующее уравнение имеет один действительный корень  $\beta$ .

2. При  $A+1 > Q^2 > A$  уравнение имеет два действительных корня.

3. При  $Q^2 > A+1$  уравнение не имеет действительных корней.

В первом случае увеличение емкости  $C$  (уменьшение  $\beta$ ) вызывает перемещение точки пересечения кривой  $\gamma(x)$

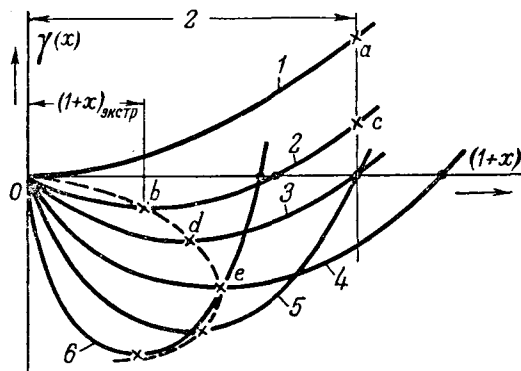


Рис. 3.

$$\beta_{31} = \frac{L}{C_{31} R^2} = 1 + \sqrt{A+1-Q^2}, \quad (11)$$

$$\beta_{3II} = \frac{L}{C_{3II} R^2} = 1 - \sqrt{A+1-Q^2}. \quad (12)$$

Сопоставление (11) и (10a) показывает, что при  $Q^2 < A+1$  имеет место неравенство

$$\beta_{31} > \beta_a. \quad (13)$$

Это означает, что при  $\beta > \beta_{31}$  уменьшение  $\beta$  вызывает увеличение  $\gamma(1)$ .

Полученные результаты иллюстрируются кривыми 1...6 рис. 3. Чем выше номер кривой, тем большему значению емкости  $C$  (или меньшему значению  $\beta$ ) он соответствует (прочие параметры считаем постоянными).

Кривая 1 соответствует случаю экстремума при  $x=-1$  ( $\omega=0$ ). При этом

$$\beta = \beta_1 = \frac{L}{C_1 R^2} = 1 + \sqrt{A+1}$$

и

$$C_1 = \frac{L}{R^2} \frac{1}{1 + \sqrt{A+1}} \quad (14)$$

[см. равенство (7)]. Увеличение емкости приводит нас от кривой 1 к кривым 2 и 3. Согласно равенству (11), при

$$C = C_{31} = \frac{L}{R^2} \frac{1}{1 + \sqrt{A+1-Q^2}},$$

$\gamma(x)$  выражается кривой 3, пересекающей ось абсцисс при  $x=1$ ,  $(1+x)=2$  или  $\omega=\omega_m$ . В результате дальнейшего увеличения  $C$  мы последовательно переходим к кривым 4, 5 и 6.

Кривая 5 соответствует значению емкости  $C$ , равному

$$C_{3II} = \frac{L}{R^2} \frac{1}{1 - \sqrt{A+1-Q^2}} \quad (15)$$

[см. равенство (12)].

с осью абсцисс за верхнюю границу интервала, и дальнейшее увеличение  $C$  эту точку внутрь интервала не возвращает. Во втором случае точка выходит за пределы интервала, но при дальнейшем увеличении  $C$  возвращается внутрь интервала. В третьем случае точка остается в пределах интервала при любом выборе емкости  $C$ , никогда не достигая его верхней границы.

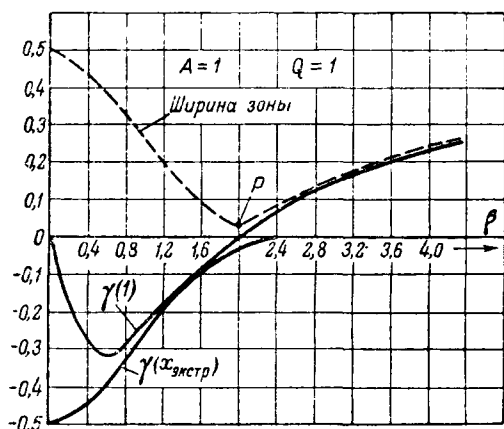


Рис. 4.

Для кривых типа 1 ширина зоны изменений  $\gamma(x)$ , определяющая наибольшее значение частотной погрешности вольтметра при „градуировке со сдвигом делений“, равна  $\gamma(1)$  (ордината точки  $a$  рис. 3), для кривых типа 2 погрешность составляет  $[\gamma(1) - \gamma(x_{\text{экстр}})]$  (разность ординат точек  $c$  и  $b$ ), для кривых типа 4 она определяется величиной  $\gamma(x_{\text{экстр}})$  (ордината точки  $e$ ).

Соответственно для малых значений  $C$  (больших  $\beta$ ) ширина зоны определяется равенством (10).

При малых  $\beta$  (кривые вида 2, рис. 3) ширина зоны определяется формулой:

$$\gamma(1) - \gamma(x_{\text{экстр}}) = \frac{2}{(A+1)^2} \times \left\{ Q^2 \left[ 1 - \frac{2\beta + A}{\beta^2 + Q^2} \right] + [V 2\beta + A - \beta]^2 \right\}. \quad (16)$$

При  $\beta \leq \beta_{31}$  ширина зоны

$$|\gamma(x_{\text{экстр}})| = \frac{2}{(A+1)^2} [V 2\beta + A - \beta]^2. \quad (17)$$

На основании формул (10), (16) и (17) можно построить кривые  $\gamma(1)$ ,  $\gamma(x_{\text{экстр}})$  и ширины зоны так, как это сделано на рис. 4.

Из рассмотрения рис. 4 следует, что ширина зоны изменений  $\gamma(x)$  является кусочно-непрерывной<sup>2</sup> функцией  $\beta$ . Наименьшее значение ширины зоны имеет место в точке излома кривой, определяющей условием  $\gamma(1)=0$  (точка  $P$  кривой). Иначе говоря, минимальная ширина зоны имеет место тогда, когда  $\gamma(x)$  имеет вид кривой 3 рис. 3. Дополнительное исследование, выходящее за рамки настоящей статьи, показывает, что это условие справедливо при любых значениях  $Q$ , меньших 1,2. К этому же условию можно прийти, используя полиномы П. Л. Чебышева (приложение).

Будем считать, что неравенство  $Q \leq 1,2$  удовлетворяется (в дальнейшем покажем, что обычно

это имеет место на практике). Исходя из этого решим основной вопрос настоящего раздела: определим максимальную частотную погрешность вольтметра  $\Delta$  при оптимальном выборе параметров схемы компенсации, соответствующем кривой вида 3 рис. 3.

При этом

$$\Delta = \frac{|\gamma(x_{\text{экстр}})|}{2}.$$

Подставляя (11) в (9), получим:

$$\Delta = \left( \frac{1}{A+1} \right)^2 [1 + V A + 1 - Q^2]^2 \times \left[ 1 - V \sqrt{1 + \frac{Q^2}{[1 + V A + 1 - Q^2]^2}} \right]^2. \quad (18)$$

Если при этом выполняется условие

$$\left[ \frac{Q}{1 + V A + 1 - Q^2} \right]^2 \ll 1, \quad (19)$$

то на основании (18) приходим к приближенной формуле:

$$\Delta \approx \frac{1}{4} \frac{1}{(A+1)^2} \frac{Q^4}{[1 + V A + 1 - Q^2]^2}. \quad (20)$$

Из равенства (20) видно, в сколь сильной степени зависит погрешность от значения  $Q = \frac{\omega_n L}{R}$ . Так, при  $A=1$ , ( $R_1=0$ ) и  $\frac{\omega_n L}{R} \approx 0,9$

$\Delta \approx 0,9\%$ ; при  $A=1$  и  $\frac{\omega_n L}{R} = 1,2$ ,  $\Delta \approx 4\%$ .

Такая резкая зависимость  $\Delta$  от  $Q$  заставляет в практических случаях выбирать  $Q < 1$ , при этом выполняется условие ( $Q \leq 1,2$ ) оптимального выбранного закона распределения  $\gamma(x)$ , а так неравенство (19).

При  $Q < 1$  можно пользоваться следующими приближенными формулами для  $\Delta$ ,  $\beta_{31}$  и  $C_{31}$ :

$$\Delta = \frac{1}{4} \frac{Q^4}{(A+1)^2 (1 + V A + 1)^2} \times \left[ 1 + \frac{Q^2}{(1 + V A + 1) V A + 1} \right] \quad (21)$$

или более грубо

$$\Delta \approx 0,25 \frac{Q^4}{(A+1)^2 (1 + V A + 1)^2} \approx \frac{0,06 (\omega_n L)^4}{R_x^2 (R + V 2 R_x R)^2}, \quad (22)$$

где  $R_x = R_1 + R$ .

На основании (11),

$$\beta_{31} = 1 + V A + 1 - Q^2 \approx 1 + V A + 1 - \frac{1}{2} \frac{Q^2}{V A + 1} = 1 + V \frac{R_x}{2R} - 0,35 \frac{(\omega_n L)^2}{V R_x R^3} \quad (23)$$

<sup>2</sup> Идея использования графика кусочно-непрерывной функции для исследования ширины зоны изменений  $\gamma(x)$  принадлежит Л. М. Заксу.

$$C_{31} = \frac{L}{R^2} \frac{1}{1 + \sqrt{2 \frac{R_2}{R} - 0,35 \frac{(\omega_m L)^2}{\sqrt{R_2 R^3}}}} \quad (22)$$

Среди полученных формул особое внимание заслуживает (20б). Из этой формулы следует, что минимально-достижимая погрешность  $\Delta$  прямо пропорциональна четвертой степени ширины частотного диапазона использования вольтметра  $\omega_m$  четвертой степени индуктивности рабочей катушки прибора. При данном входном сопротивлении вольтметра  $R_2 = R_1 + R$  она резко возрастает с уменьшением  $R$ . Поэтому лучшие результаты будут получены при  $R_1 = 0$ , когда компенсирующая емкость шунтирует все добавочное сопротивление, включаемое последовательно с  $L$  катушки прибора. В реальных условиях  $R_1$  не равно нулю вследствие наличия активного сопротивления катушки. Кроме того, изменяя  $\frac{R_1}{R}$  при том же значении  $R_2 = R_1 + R$ , имеется возможность изменять  $\beta_{31}$ , компенсируя влияние отклонений  $L$  и  $C_{31}$  от номинальных значений, что особенно важно в условиях производства. При  $R_1 = 0$  (и соответственно при  $R_2 = R$ ) погрешность в процентах:

$$\Delta \approx \left( \frac{\omega_m L}{R_2} \right)^4. \quad (20б)$$

**Определение оптимального значения компенсирующей емкости  $C$  при градуировке вольтметра без сдвига.** В условиях производства наиболее удобна градуировка вольтметра на номинальном токе с нанесением делений шкалы какого бы то ни было корректирования. В этом случае расположение кривой в соответствии с кривой 3 рис. 3 не является оптимальным. Действительно, при условии  $\gamma(-1) = 0$  максимальная погрешность уже не определяется шириной зоны изменений  $\gamma(x)$  в пределах интервала  $\langle x \rangle < 1$ . Теперь она равна либо величине  $|\gamma(1)|$ , либо  $|\gamma(1)|$  в зависимости от того, какая из этих величин больше. Как было показано,  $|\gamma(x_{экстр})|$  уменьшается с увеличением  $\beta$ , а  $|\gamma(1)|$  — растет. Поэтому наилучший результат имеет место при значении  $\beta = \beta_4$ , соответствующем условию

$$|\gamma(x_{экстр})| = -\gamma(x_{экстр}) = \gamma(1). \quad (23)$$

Подставляя в (23) выражения для  $\gamma(x_{экстр})$  и из (9) и (10), получаем следующее уравнение для определения  $\beta_4$ :

$$|\sqrt{2\beta_4 + A} - \beta_4|^2 = Q^2 \left[ 1 - \frac{2\beta_4 + A}{\beta_4^2 + Q^2} \right]. \quad (24)$$

Приближенное решение этого уравнения найдем, используя некоторые установленные ранее зависимости входящих в него функций. Рассмотрим сначала свойства функций в правой части (24).

При

$$\beta = \beta_{31} = 1 + \sqrt{A+1} - Q^2 \approx 1 + \sqrt{A+1} - \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\sqrt{A+1}},$$

$$\gamma(1) = 0 \text{ и } 1 - \frac{2\beta_4 + A}{\beta_4^2 + Q^2} = 0$$

[см. равенства (11) и (21)].

При  $\beta = \beta_1 = 1 + \sqrt{A+1}$ . В этом случае  $x_{экстр} = -1$  и  $\gamma(x_{экстр}) = 0$  [см. равенство (7)],

$$Q^2 \left[ 1 - \frac{2\beta + A}{\beta^2 + Q^2} \right] = \frac{Q^4}{(1 + \sqrt{A+1})^2 + Q^2}.$$

Таким образом нам известны значения функции в двух крайних точках интересующего нас интервала изменений  $\beta$  (для кривых вида 2 рис. 3,  $\beta_{31} < \beta < \beta_1$ ).

Заменяем кривую, выражающую функцию, прямой, проходящей через те же точки.

Уравнение прямой имеет вид:

$$z(\beta) = \frac{Q^4}{(1 + \sqrt{A+1})^2 + Q^2} \frac{\beta - \beta_{31}}{\beta_1 - \beta_{31}} = \frac{2Q^2 \sqrt{A+1}}{(1 + \sqrt{A+1})^2 + Q^2} (\beta - \beta_{31}). \quad (25)$$

Перейдем к рассмотрению левой части (24).

Обозначим  $[ \sqrt{2\beta + A} - \beta ]^2$ . При

$$\beta = \beta_1 = 1 + \sqrt{A+1}, \quad \gamma(x_{экстр}) = 0;$$

$$\begin{aligned} w(\beta) &= [ \sqrt{2\beta + A} - \beta ]^2 \approx w(\beta_1) + \\ &+ \frac{dw}{d\beta_{\beta=\beta_1}} (\beta - \beta_1) + \frac{1}{2!} \frac{d^2 w}{d\beta_{\beta=\beta_1}^2} (\beta - \beta_1)^2 = \\ &= \frac{A+1}{(1 + \sqrt{A+1})^2} (\beta - \beta_1)^2 = \\ &= \frac{A+1}{(1 + \sqrt{A+1})^2} [(\beta - \beta_3) + (\beta_3 - \beta_1)]^2. \end{aligned}$$

Согласно (21)

$$\beta_3 - \beta_1 = -\frac{1}{2} \frac{Q^2}{\sqrt{A+1}},$$

откуда

$$w(\beta) \approx \frac{A+1}{(1 + \sqrt{A+1})^2} \left[ \frac{Q^2}{2\sqrt{A+1}} - (\beta - \beta_3) \right]^2. \quad (26)$$

Приравнявая  $z(\beta)$  и  $w(\beta)$ , получаем после преобразований

$$\beta_4 - \beta_3 = 0,09 \frac{Q^2}{\sqrt{A+1}},$$

откуда

$$\begin{aligned}\beta_4 &= 1 + \sqrt{A+1} - 0,41 \frac{Q^4}{\sqrt{A+1}} = \\ &= 1 + \sqrt{2 \frac{R_\Sigma}{R}} - 0,29 \frac{(\omega_m L)^2}{\sqrt{R_\Sigma R^3}}.\end{aligned}\quad (27)$$

Поскольку в данном случае погрешность  $\Delta = |\gamma(x_{экстр})|$ , то подставляя (27) в (9), получаем:

$$\begin{aligned}\Delta &\approx 0,36 \frac{Q^4}{(A+1)^2 (1 + \sqrt{A+1})^2} = \\ &= 0,09 \frac{(\omega_m L)^4}{R_\Sigma^2 (R + \sqrt{2R_\Sigma R})^2}.\end{aligned}\quad (28)$$

Сопоставление (28) и (20б) показывает, что отказ от сдвига делений при градуировке вольтметра приводит к увеличению погрешности приблизительно в 1,5 раза. Таким образом, выигрыш в точности, благодаря сдвигу делений, эквивалентен эффекту увеличения  $R_\Sigma$  или уменьшения  $\omega_m L$  на 10% [см. равенство (20в)]. Поэтому практически градуировка без сдвига при правильном выборе параметров обеспечивает получение результатов, близких к оптимальным.

**Определение частотной погрешности вольтметра с учетом зависимости индуктивности рабочих катушек от положения подвижной системы прибора**<sup>3</sup>. Электромеханический момент, действующий на подвижную систему приборов электромагнитной и электродинамической системы<sup>4</sup>, равен  $M_{эм} = I^2 \frac{dL}{d\alpha}$ . Поэтому важной особенностью этих приборов, вытекающей из самого принципа их действия, является зависимость индуктивности их рабочих катушек от положения подвижной системы.

Если параметры схемы рис. 1 выбраны так, чтобы обеспечить сведение к минимуму частотной погрешности при измерении некоторого напряжения  $U_k$ , то при изменении измеряемого напряжения оптимальные условия нарушаются. Если параметры схемы компенсации были установлены, исходя из условий градуировки прибора на постоянном токе без сдвига и соответственно при измерении напряжения  $U_k$  функция  $\gamma(x)$  выражалась кривой 2 рис. 5, то при измерении напряжений, больших  $U_k$ , зависимость  $\gamma(x)$  вследствие увеличения индуктивности рабочих катушек прибора приобретает вид кривой 1 [ $|\gamma(1)|$  увеличивается,  $|\gamma(x_{экстр})|$  уменьшается]. При измерении  $U < U_k$  эта зависимость приобретает вид кривой 3 [ $|\gamma(1)|$  уменьшается,  $|\gamma(x_{экстр})|$  возрастает].

Рассмотрим случай компенсации на краю шкалы, когда  $U_k = U_{макс}$ , в предположении, что индук-

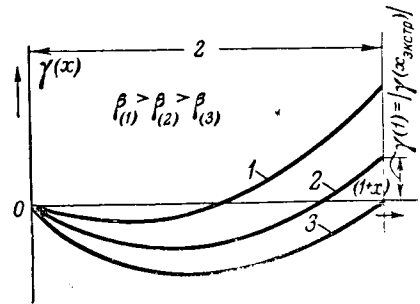


Рис. 5.

тивность рабочих катушек находится в линейной зависимости от измеряемого напряжения:

$$L = L_{мин} + aU; \quad L_{макс} = L_{мин} + aU_{макс}.$$

На основании (27) имеем:

$$\beta = 1 + \sqrt{A+1} - 0,41 \frac{Q_{макс}^2}{\sqrt{A+1}},$$

где

$$Q_{макс} = \frac{\omega_m L_{макс}}{R}$$

и

$$C_1 = \frac{L_{макс}}{R^2} \frac{1}{1 + \sqrt{A+1} - 0,41 \frac{Q_{макс}^2}{\sqrt{A+1}}}.$$

Поскольку при максимальной величине измеряемого напряжения ( $L = L_{макс}$ ) значение  $\gamma(1) = |\gamma(x_{экстр})|$ , то для всех остальных точек шкалы погрешность определяется значением  $|\gamma(x_{экстр})|$ .

На основании формул (9), (29) и (30) получаем:

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{2}{(A+1)^2} \times \\ &\times \left\{ \sqrt{2 \left[ 1 + \sqrt{A+1} - 0,41 \frac{Q_{макс}^2}{\sqrt{A+1}} \right] \left[ 1 - \frac{a(U_m - U)}{L_{макс}} \right] + A} \right. \\ &\left. - \left[ 1 + \sqrt{A+1} - 0,41 \frac{Q_{макс}^2}{\sqrt{A+1}} \right] \left[ 1 - \frac{a(U_m - U)}{L_{макс}} \right] \right\}.\end{aligned}\quad (3)$$

Введем обозначения

$$1 + \sqrt{A+1} = \beta_1; \quad 0,41 \frac{Q_{макс}^2}{\sqrt{A+1}} = \Delta\beta;$$

$$\frac{a(U_m - U)}{L_{макс}} = \xi.\quad (3)$$

В обычных случаях  $\xi \ll 1$  и  $\Delta\beta \ll \beta_1$ . Воспользовавшись этим, получаем, пренебрегая малыми величинами:

$$\Delta = \frac{2}{(A+1)^2} (\Delta\beta + \beta_1 \xi)^2 \left( 1 - \frac{1}{\beta_1} \right)^2.\quad (3)$$

<sup>3</sup> Исследование, проведенное в настоящем параграфе, выполнено А. М. Мессерером под руководством автора.

<sup>4</sup> В случае электродинамической системы  $L$  следует понимать как отношение полного потокоцепления катушек к току  $I$  в катушках.

равенство (33) дает выражение для относительной погрешности.

Для оценки точности вольтметра нам важно не относительную, а приведенную погрешность:

$$\Delta_{np} = \frac{U}{U_m} \Delta. \quad (34)$$

На основании (33) и (34) получаем:

$$\Delta_{np} = \frac{2}{(A+1)^2} \left[ \frac{0,41 Q_{\max}^2}{1 + \sqrt{A+1}} + \sqrt{A+1} \times \right. \\ \left. \times \frac{a U_m}{L_{\max}} \left( 1 - \frac{U}{U_m} \right) \right]^2 \frac{U}{U_m}. \quad (35)$$

$\Delta_{np} = f\left(\frac{U}{U_m}\right)$  имеет максимум при

$$\frac{U}{U_m} = \left( \frac{U}{U_m} \right)_{\text{экстр}} = \\ = \frac{1}{3} \left[ 0,41 \frac{Q_{\max}^2}{(1 + \sqrt{A+1}) \sqrt{A+1}} \cdot \frac{L_{\max}}{a U_m} + 1 \right]. \quad (36)$$

$$\Delta_{np, \max} = \left( \frac{2}{A+1} \right)^2 \frac{2}{\sqrt{A+1}} \cdot \frac{L_{\max}}{L_{\max} - L_{\min}} \times \\ \times \frac{1}{27} \left[ \frac{0,41 Q_{\max}^2}{1 + \sqrt{A+1}} + \sqrt{A+1} \left( 1 - \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \right) \right]^3. \quad (37)$$

Максимум имеет место при  $U < U_m$  при соблюдении неравенства

$$0,41 \frac{Q_{\max}^2}{(1 + \sqrt{A+1}) \sqrt{A+1}} \frac{L_{\max}}{a U_{\max}} < 2. \quad (38)$$

В противном случае максимальная приведенная погрешность получается при  $U = U_m$  (на всей шкале).

Можно утверждать, что максимальное значение приведенной погрешности может быть уменьшено, если компенсация осуществляется не при  $U = U_m$ , а при  $U = U_k < U_m$ . Вопрос о рациональном выборе точки компенсации на шкале нуждается в отдельном рассмотрении, однако есть основания считать, что в большинстве практических случаев компенсация в конце шкалы приводит к результатам, близким к оптимальным.

**Заключение.** 1. Результаты настоящей работы могут возбудить рационального выбора параметров схемы частотной компенсации вольтметра переменного тока.

2. Разработанная методика может быть использована для рассмотрения вопросов, не нашедших отражения в статье, в частности может быть определено влияние зависимости электрических параметров рабочих катушек вольтметра от частоты, установлена зависимость частотной погрешности от характера шкалы прибора и т. д.

3. Компенсация частотной погрешности вольтметра переменного тока является одной из многочисленных задач компенсации дополнительных погрешностей измерительных приборов. Ме-

тод решения этой задачи, иллюстрируемый настоящей статьей, может быть использован и во многих других случаях<sup>5</sup>.

**Приложение. Применение полиномов П. Л. Чебышева к рассматриваемой задаче.** Для практических целей используются известные результаты теории функций, наименее уклоняющиеся от нуля, полученные для системы Чебышева вида [Л. 1]:

$$P(t) = p_1 \varphi_1(t) + p_2 \varphi_2(t) + \dots + p_n \varphi_n(t), \quad (I,1)$$

где один из коэффициентов задан, а остальные могут выбираться произвольно и независимо друг от друга. Теорема Чебышева устанавливает условия для выбора коэффициентов, при выполнении которых наибольшее уклонение функции  $P(t)$  от нуля на интервале изменения  $t$  от некоторого значения  $a$  до некоторого значения  $b$  — минимально.

В частности, для полиномов степени  $n+1$  с коэффициентом при старшем члене, равном единице, П. Л. Чебышев показал, что полином

$$T_{n+1}(x) = \frac{1}{2^{n+1}} [(x + \sqrt{x^2 - 1})^{n+1} + (x - \sqrt{x^2 - 1})^{n+1}]$$

в указанном смысле наименее уклоняется от нуля.

Для  $n=1$ ,  $n=2$ ,  $n=3$  полиномы Чебышева имеют соответственно вид:

$$T_2(x) = x^2 - \frac{1}{2}; \quad T_3(x) = x^3 - \frac{3}{4}x;$$

$$T_4(x) = x^4 - x^2 + \frac{1}{8}.$$

При изучении вопроса компенсации дополнительных погрешностей приборов мы также имеем возможность представить выражение для погрешности в виде ряда (I,1).

В общем случае изменение того или иного параметра вызывает одновременное изменение нескольких коэффициентов ряда (I,1).

Строго говоря, условие взаимной независимости коэффициентов не выполняется, и мы не имеем права непосредственно применить выводы теоремы Чебышева. Однако при решении интересующих нас задач весьма часты случаи, когда изменение одного параметра, с помощью которого осуществляется компенсация дополнительной погрешности, оказывает в заданном диапазоне изменения  $t$  сильное влияние на величину одного из членов ряда (I,1) и относительно небольшое на значения других членов ряда. При этом мы можем считать, что выбор того или иного значения параметра компенсации позволяет осуществлять выбор одного из коэффициентов независимо от значений других и непосредственно использовать результаты теоремы Чебышева, которые обычно дают возможность подойти к задачам рациональной компенсации с весьма общей точки зрения. Для исследования частотной погрешности вольтметра функция  $\gamma(x)$ , выраженная равенством (4), может быть представлена на основании малости  $Q^2$  первыми тремя членами соответствующего степенного ряда:

$$\gamma(x) = k_0 + k_1 x + k_2 x^2 = k_0 + \\ + \frac{Q^2}{(A+1)^2} \left[ 1 - 2 \frac{2\beta + A}{2\beta^2 + Q^2} + 2 \frac{(2\beta + A) Q^2}{(2\beta^2 + Q^2)^2} \right] x + \\ + 2 \frac{Q^4}{(A+1)^2 (2\beta^2 + Q^2)^2} \left[ 1 - \frac{Q^2}{(2\beta^2 + Q^2)} \right] x^2. \quad (I,2)$$

<sup>5</sup> Например, при осуществлении рациональной частотной компенсации амперметров, ваттметров, фазометров, образцовых сопротивлений, индуктивностей, емкостей, электрических мостов и компенсаторов, при выборе конструктивных и электрических параметров элементов температурной компенсации приборов, при разработке мероприятий для уменьшения влияния неуравновешенности подвижной системы прибора, влияния внешнего магнитного поля, влияния фазных погрешностей и т. д.



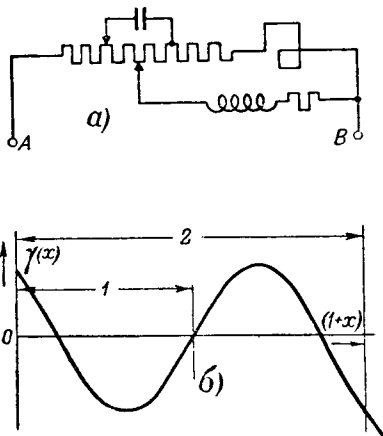


Рис. 6.

В выражении (1,2)  $k_0$  выбирается произвольно, а коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  зависят от  $\beta$ .

В большинстве реальных случаев ( $Q^2 < 1$ ) изменения  $k_1$ , вызываемые изменением  $\beta$ , оказывают на погрешность прибора (в интервале  $-1 \leq x \leq 1$ ) большее влияние, чем изменение  $k_2$ , так как

$$\frac{d|k_1|}{d\beta} > \frac{d|k_2|}{d\beta}.$$

При этом для нахождения оптимального значения параметра мы можем не принимать во внимание зависимость  $k_2$  от  $\beta$  (считать  $k_2 = \text{const}$ ).

В этих предположениях  $k_1$  рассматривался как независимый коэффициент, то или иное значение которого может быть установлено соответствующим выбором значения  $\beta$ .

Переписывая (1,2) в виде  $\gamma(x) = k_2 \left( x^2 + \frac{k_1}{k_2} x + \frac{k_0}{k_2} \right)$ , приходим к выводу, что произвольные коэффициенты  $\frac{k_1}{k_2}$  и  $\frac{k_0}{k_2}$  должны быть выбраны равными соответствующим коэффициентам полинома Чебышева второй степени:

$$\frac{k_1}{k_2} = 0 \text{ и } \frac{k_0}{k_2} = -\frac{1}{2}.$$

Из условия  $k_1 = 0$  имеем:

$$\beta^4 - 2\beta^3 - (A - Q^2)\beta^2 + \frac{Q^4}{4} = 0.$$

Пренебрегая последним членом левой части равенства, получим:

$$\beta^2 - 2\beta - (A - Q^2) = 0,$$

откуда

$$\beta = \beta_3 = \frac{L}{C_3 R} = 1 \pm \sqrt{A + 1 - Q^2}$$

в полном соответствии с выражениями (11) и (12). Говоря, используя полиномы Чебышева, мы пришли коротким путем к результату, полученному с помощью обычных методов анализа.

Возможность использования полиномов Чебышева для выбора рациональных параметров компенсации представляет особый интерес в тех случаях, когда исследуются сложные схемы и исследование другими методами затруднительно.

Рассмотрим  $\gamma(x)$  в виде ряда  $\gamma(x) = A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 + \dots$

В обычных случаях некомпенсированной схемы ряд быстро сходится, так как каждый последующий член значительно меньше предыдущего.

Можно различать схемы некомпенсированные, некомпенсированные первого, второго, ...,  $n$ -ного порядка по числу экстремумов функции  $\gamma(x)$  при надлежащем выборе параметров элементов компенсации (при котором число максимально).

Для выбора параметров компенсированной схемы первого порядка, примером которой является схема рис. 6, мы ограничивались первыми тремя членами ряда  $\gamma(x)$  для решений той же задачи для компенсированной схемы  $n$ -ного порядка удерживаем первые  $(n+2)$  члена ряда.

Быстрая сходимость ряда  $\gamma(x)$  дает основания для использования общего метода выбора параметров компенсационной схемы  $n$ -ного порядка, считая  $(n+2)$ -й член ряда независимым от параметров элементов компенсации. Устанавливая их значения так, чтобы функция  $\gamma(x)$  в интервале  $-1 \leq x \leq 1$  наименее уклонялась от нуля в смысле Чебышева. При этом коэффициенты ряда могут быть разделены непосредственно как коэффициенты полинома Чебышева соответствующей  $(n+1)$ -й степени. На примере компенсационной схемы первого порядка, уже было показано, как с помощью этого метода можно прийти к оптимальным результатам. Такой выбор параметров приводит к совершенно определенному распределению погрешности на интервале. Так, для компенсационной схемы 2-го порядка (рис. 6,а) распределение погрешности, определяющееся полиномом Чебышева 3-й степени,  $\gamma_1(x) = -|\gamma_{\text{макс}}| \left( x^3 - \frac{3}{4}x \right)$  (рис. 6,б).

Следует заметить, что в случае градуировки без знака, когда величина  $A_0$  находится из условия  $\gamma(-1) = 0$ , можно воспользоваться таким же приемом, но тогда уже не приходим к полиномам Чебышева (система Чебышева с нулевой точкой).

## Литература

И. Н. И. Ахизер. Лекции по теории аппроксимации. Государственное технико-теоретическое издательство, 1947.

[8. 6. 1951]

## Дмитрий Александрович Лачинов

*К 50-летию со дня смерти*

8 (15) октября 1902 г. в Петербурге умер один из выдающихся русских физиков и электротехников Дмитрий Александрович Лачинов.

Именем Д. А. Лачинова связана целая эпоха развития русской и мировой электротехники. Дмитрий Александрович принадлежал к группе русских физиков, ведущих хорошую школу руководством знаменитого русского академика В. Ленца и стремившихся не только и не столько, как прежде, к изучению электрических свойств веществ с целью выяснения всех возможностей его практического использования, а к исследованию различных основ теории.

Д. А. Лачинов родился 30 (10) мая 1842 г. в г. Шацкано оставшись сиротой, Дмитрий Александрович был помещен в пансион 1-й Петербургской гимназии, по окончании которой в 1859 г. пошел на физико-математический факультет Петербургского университета. Репрессии против студенчества, принятые в 1861 г. царским правительством в связи с революционными выступлениями, связанными с крестьянскими «бунтами» против помещиков, привели к закрытию университета. Это вынудило Д. А. Лачинова, как и многих других студентов, уехать для продолжения образования за границу, в Гейдельберг. Там в течение 1½ лет он читал лекции и работал в лабораториях известных физиков — Бунзена, Кирхгофа и Гельмгольца. Возвратившись в Россию (1863 г.), Лачинов в 1864 г. окончил университет, а в следующем году представил «рассуждение» (диссертацию) на звание кандидата наук. Степень эта была присуждена ему Советом Петербургского университета 20 декабря 1865 г.

Интересовавшись еще в университете электротехникой, Лачинов с первых дней своей самостоятельной работы в Петербургском земледельческом (позднее переименованном в Лесной) институте начал последовательную разработку важнейших ее проблем. Так, в конце 60-х г.г., одной из важнейших проблем электротехники было усовершенствование источников электрического тока для экспериментальных работ, Д. А. Лачинов занялся изучением и усовершенствованием гальванических элементов, создав новый тип элементов с малым внутренним сопротивлением.

Гальванический элемент Д. А. Лачинова был экспонирован на Всероссийской промышленной выставке в 1870 г. и получил одобрение эксперта выставки — академика Б. С. Якоби. Лачинову был присужден почетный отзыв выставки — первая награда на промышленных выставках за русское изобретение в области электротехники.



Почти одновременно он начал глубокое и систематическое изучение свойств электрической дуги, продолжавшееся свыше 10 лет и приведшее его к созданию дугового диафаноскопа, к обнаружению ряда неизвестных ранее свойств электрической дуги, к созданию теоретических предпосылок для дальнейшего практического использования ее, в частности для сварки металлов.

Почти одновременно он начал глубокое и систематическое изучение свойств электрической дуги, продолжавшееся свыше 10 лет и приведшее его к созданию дугового диафаноскопа, к обнаружению ряда неизвестных ранее свойств электрической дуги, к созданию теоретических предпосылок для дальнейшего практического использования ее, в частности для сварки металлов.

Эти занятия Дмитрия Александровича вопросами электрофизики и создание в Лесном институте хорошо оборудованной лаборатории привлекли внимание многих выдающихся физиков (в частности, Б. С. Якоби) и выдвинул Д. А. Лачинова в первые ряды русских ученых. В 1872 г. Д. А. Лачинов вместе с Д. И. Менделеевым, Б. С. Якоби, Ф. Ф. Петрушевским и другими физиками принял участие в организации первого объединения русских физиков — Русского физического общества, о котором «можно без преувеличения сказать, что история его есть вместе с тем история физики в России» [Л. 1].

В Русском физическом обществе (позднее — физическом отделении Русского физико-химического общества) активная деятельность Д. А. Лачинова продолжалась главным образом в области электрофизики. Но уже к концу 70-х г.г. практические успехи применения электричества в самых разнообразных отраслях техники сделали недостаточным разработку только теоретических вопросов.

Деятельность таких электротехников, как В. Н. Чиколев, П. Н. Яблочков и др., наряду с успехами электротехники за границей, вывела электричество на широкую дорогу повсеместного и разнообразного использования. Д. А. Лачинов, хорошо представлявший себе стоящие перед электротехникой задачи, становится активным участником Русского технического общества (осн. в 1866 г.) и вскоре одним из инициаторов создания и горячим энтузиастом Электротехнического (VI) отдела РТО и редактором журнала «Электричество», в котором было опубликовано немало статей самого Д. А. Лачинова. Среди них особенное значение имеет ставшая классической статья Лачинова «Электромеханическая работа», вышедшая вскоре отдельным оттиском под более полным названием «Электромеханическая работа и элементарная теория электродвигателей (динамоэлектрических машин)» [Л. 2]. Д. А. Лачинов первый внес в обсуждение вопроса о передаче электроэнергии на большие расстояния строгую логику математического обоснования физических процессов, происходящих в генераторах, в линиях передачи и в токоприемных машинах. Лачинов дал полное обоснование зависимости к. п. д. передачи электроэнергии на большие расстояния от тока, циркулирующего в цепи, и показал возможность передачи любых количеств электроэнергии на значительные расстояния без больших потерь путем соответствующего увеличения напряжения передачи. Через 14 мес. положения, высказанные Д. А. Лачиновым, были повторены французским электротехником М. Депре и затем подтверждены рядом практически осуществленных электропередач. Теория Д. А. Лачинова и опыты М. Депре послужили дальнейшему общему развитию электротехники и, в частности, широкому применению высоких напряжений. Вся современная высоковольтная техника ведет свое начало со времени появления классического труда Дмитрия Александровича Лачинова.

Редакция журнала «Электричество» неоднократно подчеркивала приоритет русского ученого в формулировке основных законов экономичности дальних передач. Так, публикуя в 1882 г. сообщение об опытах М. Депре, пришедшего к выводу о том, что «полезное действие не зависит от расстояния», редакция журнала «Электричество» указывала: «закон этот был формулирован почти теми же словами в 1880 г. Лачиновым» [Л. 3].

В 1881 г., когда VI отделу РТО была поручена организация Русского отдела на Международной электрической выставке в Париже, Д. А. Лачинов был назначен специальным комиссаром этого отдела и делегатом на Международный конгресс электриков. С большим достоинством представлял он Россию перед лицом иностранных ученых. Заслуженным авторитетом пользовался он на конгрессе, где мысли, высказанные им в «Электромеханической работе», получили всеобщее признание.

С большим интересом слушали участники конгресса выступления Д. А. Лачинова на общих заседаниях, посвященные теоретическим вопросам (например изучению работы динамоэлек-

трических двигателей). За экспонированный на выставке оригинальный оптический динамометр, значительно упрощавший замеры мощности, вывешенной первичным двигателем, Лачинов награжден бронзовой медалью.

Доклад Лачинова о Международной выставке в Париже, сделанный им в Русском техническом обществе (опубликован в записках РТО [Л. 4]), вызвал оживленную дискуссию. Передовые электротехники, видевшие в успехах технического применения электричества в промышленности путь к преодолению технической отсталости своей страны, горячо обсуждали перспективы использования постоянного и переменного токов для промышленных силовых целей.

Вскоре после возвращения из Парижа Д. А. Лачинов принялся за разработку другого важного в то время вопроса, связанного с применением параллельного и смешанного включения ламп. В блестящей статье «О параллельном соединении электрических ламп» [Л. 5] Лачинов провел глубокого анализа условий работы дуговых ламп и применявшихся для создания устойчивости жима горения их специальных реостатов, показав, что реостаты эти могут быть заменены лампами накаливания, вводимыми последовательно с дуговыми фонарями.

В 1881 г. в статье «Динамоэлектрические машины без железа» [Л. 6] Лачинов предложил работавшую им конструкцию динамоэлектрических машин, состоящих из обмоток без железных сердечников, для изучения различных вопросов теории этих машин в чистом виде, без усложняющего влияния намагничивания железа.

Многочисленные работы Лачинова в области фотометрии, начатые им еще в 1876 г. с усовершенствования фотометра, были продолжены в 80-х гг. в связи с активным участием РТО в обсуждении вопросов улучшения освещения столиц. В 1881 г. Дмитрий Александрович предложил оригинальный способ измерения света уличных фонарей, значительно упрощавший измерения, а позднее он усовершенствовал распространение в те годы компенсационный фотометр. Одним из них Лачинов выступил с идеей создания центральной станции фотометрии и добился участия России в заключении международной конвенции об установлении единых светотехнических величин.

В эти же годы Д. А. Лачинов занимался усовершенствованием свинцовых аккумуляторов; предложил способ покрытия пластин особым составом — губчатым свинцом [Л. 7]. В 1881 г. Лачинову была выдана французская привилегия на это изобретение, сохраняющее свое значение и до настоящего времени.

Предложение Д. А. Лачинова об изготовлении параболических рефлекторов путем центробежной отливки их [Л. 8] дало возможность осуществить прожекторы совершенной конструкции, предложенной В. Н. Чиколевым.

В 1888 г., в связи с растущим интересом к воздухоплаванию, Лачинов разработал проект электролитического добывания водорода (для наполнения воздушных шаров) путем электростатического разложения воды.

и [Л. 9]. Разработав два варианта конструкции специальной батареи для электролиза, А. Лачинов получил на это изобретение патенты во Франции, Англии, Германии, Бельгии подал заявку на привилегию в России. Интересно отметить, что в описании этого изобретения 1889 г. Лачинов указывал на возможность использования получаемого при электролизе воды водорода для обогащенного дутья в металлургическом производстве и др.

К этому же периоду относятся разработка Лачиновым (совместно с А. Г. Щавинским) системы контроля за состоянием изоляции высоковольтных проводов и кабеля и создание особого аппарата — дефектоскопа. Кроме того, им также сконструирован оригинальный искатель места повреждения кабеля [Л. 10]. Вся система контроля изоляции и метод нахождения места повреждения ее, несмотря на некоторую громоздкость, были весьма оригинальными и несомненно, заслуживали внимания. Работа над созданием новых приборов еще раз показывает, с каким неослабным вниманием следил Дмитрий Александрович за успехами молодой электротехники и главным образом техники высоковольтного напряжения.

Одной из характернейших черт деятельности Дмитрия Александровича Лачинова были постоянный интерес его к работам русских ученых и электротехников и стремление к утверждению приоритета. Так, например, при обсуждении в Русском техническом обществе сообщения о докладах, касающихся изобретения И. И. Ползунова паровой машины, Д. А. Лачинов, отвечая на попытку умалить заслуги гениального изобретателя, горячо отстаивал приоритет Ползунова в изобретении паровой машины и доказывал существование и работу не только модели, но и самой машины.

Еще более горячо отстаивал Лачинов приоритет русских изобретателей электротехников, азыма многим из них значительную помощь. Когда в 1884 г. Н. Н. Бенардос впервые в мире осуществил дуговую электрическую сварку металлов, Дмитрий Александрович оказал ему большую помощь: своими советами (например, указанием возможности подводной сварки металлов и др.) впервые изложил сущность изобретения Бенардоса в докладе Русскому физико-химическому обществу, а затем описал это в журнале «Электричество» [Л. 11]. Лачинов впоследствии не раз выступал в защиту приоритета Н. Н. Бенардоса, широко пропагандировал применение электродами сварки металлов.

Со всей страстью глубокого патриота Лачинов протестовал против забвения русских изобретений и преклонения перед иностранными именами. Стаивая свой приоритет в изобретении аккумуляторов с пластинами из губчатого свинца и пропагандируя против беззастенчивого использования сторонниками его идеи, Лачинов писал в редакцию журнала «Электричество»: «Пишу Вам это для того, чтобы протестовать против привнесения Де-Монто, но только для того, чтобы отдать должное русским изобретателям, идеи которых



Фотография 1889 или 1890 г. из сборника «100 лет Петербургского лесного института», СПб, 1902 г. В первом ряду слева Д. А. Лачинов, справа Г. А. Любославский.

так трудно прививаются в России, но будучи перенесены на иностранную почву, нередко приживаются и получают обширное распространение и, наконец, возвращаются в Россию, уже под иностранной фирмой» [Л. 12].

Показательно отношение Д. А. Лачинова к изобретению Александра Степановича Попова. Знакомство и дружба с гениальным изобретателем радио возникли еще в самом начале научной работы Александра Степановича. Еще в мае 1895 г., сразу же после первой демонстрации А. С. Поповым грозоотметчика, Лачинов установил этот прибор на метеорологической станции Лесного института. Описание этого изобретения мы находим в книге Д. А. Лачинова «Об основах метеорологии», вышедшей в июне 1895 г. В 1898 г., когда оказалось необходимым бороться против притязаний Маркони на приоритет в изобретении радио («беспроволочной телеграфии»), Лачинов активно выступил в защиту А. С. Попова. В газетных статьях, в многочисленных выступлениях он восстанавливал истину, доказывая неосновательность притязаний Маркони.

Лачинов принимал непосредственное участие в развитии идей Попова. Так, при обсуждении сообщения А. С. Попова «О телеграфировании без проводов» в VI отделе РТО (18 ноября 1897 г.) [Л. 13] Лачинов высказал идею применения метода трансляции как средства для увеличения дальности передачи: «... нам представляется, что можно теперь уже во много раз увеличить это расстояние (дальность передачи — Б. Р.), применяя к системе Попова идею телеграфной трансляции», — писал он в одной из статей [Л. 14]. Эта идея нашла поддержку и одобрение у всех присутствовавших на докладе, в том числе самого изобретателя — А. С. Попова.

Активная помощь и содействие со стороны Д. А. Лачинова многим русским электротехникам в их изобретательской работе почти не освещены в печати. А между тем эта сторона его деятельности, значительно способствовавшая развитию электротехники в России, заслуживает особого внимания. В. Н. Чиколев, Н. Н. Бенардос, А. И. Полешко, С. Степанов, А. Л. Линева и мно-

гие другие всегда находили в лице Дмитрия Александровича искренне расположенного, готового поделиться всеми своими глубокими знаниями, товарища, для которого интересы дела всегда были выше личных. Об этом говорят не только многочисленные документы, оставшиеся неизвестными современникам его и обнаруженные лишь советскими исследователями, но и личные воспоминания его друзей (например, В. Н. Чиколева, ближайшего друга Дмитрия Александровича). Об этой помощи вспоминает также А. И. Полешко в своем письме в редакцию журнала «Электричество» [Л. 15].

Свыше двадцати лет Лачинов был экспертом по вопросам электротехники в Комитете по техническим делам Министерства финансов, ведавшем выдачей привилегий на изобретения. Лачинов неизменно поддерживал новое, разумное, передовое, помогая получению привилегий теми изобретателями, чьи мысли действительно способствовали прогрессу. Поддерживая Бенардоса, Доливо-Добровольского, Полешко, Печковского, Владимирова и других русских изобретателей, Лачинов настороженно относился к таким искателям легкой наживы, как Де-Монто, Бари и др., повторявшим в своих заявках на привилегии то, что уже ранее было изобретено русскими.

Заслуги Д. А. Лачинова перед практической электротехникой были высоко оценены электротехнической общественностью в лице Совета первого русского электротехнического института: в 1899 г. Лачинову было присуждено звание почетного инженера-электрика.

Не менее значительна деятельность Д. А. Лачинова как геофизика и метеоролога. Он создал первый в России самостоятельный курс метеорологии и климатологии (1889 г.), получивший всеобщее одобрение. В 1895 г. издание было повторено в совершенно переработанном виде. Особенно в ней выделялась глава об атмосферном электричестве, актино-электрических явлениях и методах их наблюдений. Так, в последние годы жизни, отдавшись метеорологии, Лачинов стал одним из крупнейших русских метеорологов и геофизиков.

Доклад на XI съезде естествоиспытателей и врачей 22 декабря 1901 г. «Об электрическом поле атмосферы» и обзорная статья «О последних работах по атмосферному электричеству» были последними выступлениями Дмитрия Александровича.

Как педагог Лачинов был исключительно требователен к себе. Вспоминая о лекциях Дмитрия Александровича, многолетний его ассистент Г. А. Любославский писал: «Близко зная Дмитрия Александровича в течение 15 лет, я могу засвидетельствовать, что ни одной лекции не пропустил он без того, чтобы перед самым выходом в аудиторию не просмотреть еще раз программу

предстоящего чтения. Прийти же к Дмитрию Александровичу вечером накануне его лекции значило — всегда и наверняка застать его за подготовкой к завтрашнему чтению, обложив книгами и журналами и делающего заметки к программе своего предстоящего чтения» [Л. 16].

Придавая большое значение экспериментальной работе студентов, Лачинов ввел в Ленинском институте практические занятия в организованном им физическом кабинете. Этот прекрасно оборудованный кабинет был одним из лучших в России. Созданная в 1887 г. при Институте метеорологическая станция вскоре превратилась в станцию II разряда и приобрела известность в системе метеорологических станций России.

Воспоминания современников рисуют образ Дмитрия Александровича как человека исключительных душевных качеств. Прекрасный товарищ, чуткий и отзывчивый, остроумный беседник, он был душой небольшого, но дружного кружка физиков и электротехников конца прошлого столетия. Необыкновенно тепло вспоминает об этом кружке покойный академик В. Ф. Миткевич [Л. 17].

Советские электротехники с большим уважением относятся к памяти выдающегося ученого. О вкладе Д. А. Лачинова в науку об электричестве и в электромеханику рассказывают в своих книгах М. А. Шателен, В. П. Никитин, Л. М. Петровский, В. В. Данилевский и многие другие.

Имя Дмитрия Александровича Лачинова знают широкие круги советской научно-технической интеллигенции и весь советский народ.

#### Литература

1. Журнал Русского физико-химического общества, вып. 9, стр. 518, 1882.
2. Электричество, стр. 9—11, № 1; стр. 27—30, № 2; стр. 65—69, № 5; стр. 85—87, № 6; стр. 104—106, № 7, 1882.
3. Электричество, стр. 269, № 18—19, 1882.
4. Записки Русского технического общества, вып. 13, стр. 32—74, 1882.
5. Оттиск из журнала ЗРТО, стр. 44.
6. Электричество, стр. 165—168, № 12; стр. 181—182, № 13, 1882.
7. Электричество, стр. 50—52, № 3—4, 1881.
8. Электричество, стр. 63—64, № 7, 1887.
9. Электричество, стр. 109—113, № 7, 1881.
10. Электричество, стр. 32, № 2, 1891.
11. Записки Русского технического общества, вып. 52—67, 1893.
12. Электричество, стр. 72—77, № 5—6, 1892.
13. Электричество, стр. 64—66, № 7, 1887.
14. Электричество, стр. 181—182, № 17—18, 1887.
15. Записки Русского технического общества, вып. 2—3, 1898.
16. Газета „Русский инвалид“ № 250, 1897 г. Телеграфирование без проводов.
17. Электричество, стр. 205, № 9—10, 1890.
18. Известия СПб Лесного института, вып. IX, 1944.
19. Электричество, стр. 28, № 4, 1944.

Кандидат техн. наук Б. Н. РЖОНСНИКОВ

Ленинград

# Первая всесоюзная светотехническая выставка 1927 года<sup>1</sup>

25 лет назад, 20 августа 1927 г., в залах Политехнического музея в Москве открылась Первая всесоюзная светотехническая выставка, приуроченная к десятилетию Великой Октябрьской социалистической революции.

Выставка должна была наглядно продемонстрировать, как успешно решались победившим пролетариатом сложные производственно-технические задачи, какие значительные достижения достигались в таких отраслях промышленности, которые до революции либо совсем в России не существовали, либо имели мелкий масштаб и не обеспечивали даже в малой степени потребность страны в соответствующих изделиях. Источники света, осветительные и светопроекционные приборы, оптические инструменты, измерительные приборы, рентгеновская аппаратура, приборы для фотографических и кинематографических целей — перечень групп экспонатов отечественного производства, которые имелось в виду показать на выставке.

Одновременно ставились и другие цели, не менее важные:

- 1) выяснение возможностей применения светотехники в различных областях деятельности;
- 2) выявление инициативы различных объединений и отдельных лиц в области изобретений и усовершенствований в светотехнике;
- 3) ознакомление с историей развития светотехники путем демонстрация на исторических экспонатах приоритета русских изобретателей в области электрического освещения (Петров, Лодыгин и др.);
- 4) пропаганда в широких слоях трудящихся важности электрификации в области электрического освещения путем демонстрации различных осветительных установок, рассчитанных на всевозможные нужды труда и быта и для специальных целей;
- 5) параллельное демонстрирование состояния светотехнической промышленности в иностранных государствах.

Таким образом, Светотехническая выставка являлась не только как производственно-технической, но и как широкое общественное и пропагандистское мероприятие большого масштаба; выставка имела определенное государственное значение, и этим она коренным образом отличалась от промышленных выставок дореволюционного времени, рассчитанных на ограниченный круг посетителей и не имевших в условиях капи-

талистической системы ни серьезных перспектив, ни заслуженного резонанса. В основных чертах первой всесоюзной светотехнической выставки уже нетрудно было видеть ростки ближайшего будущего, новое направление — показ достижений советского общества в борьбе за индустриализацию страны, показ успехов строящегося социалистического хозяйства и социалистической культуры.

На призыв инициативной группы, в основном состоявшей из ведущих советских светотехников и научных работников Политехнического музея во главе с почетным директором музея старейшим профессором Московского высшего технического училища П. П. Петровым, быстро и сочувственно откликнулись промышленные тресты объединения, организации военного и морского ведомств, научные и учебные учреждения и научно-техническая общественность.

Оргкомитет выставки при участии акад. Д. С. Рождественского, акад. А. Ф. Иоффе, профессоров М. А. Бонч-Бруевича, А. К. Тимирязева, Н. Е. Успенского, М. А. Шателена и др. провел огромную подготовительную работу. Политехнический музей на время выставки свернул все свои экспозиции и предоставил для выставки площадь 1556 м<sup>2</sup>, не считая вспомогательных и конторских помещений. Выставка организовывалась с исключительной быстротой, и в конце июля 1927 г. были устроены все отделы выставки: а) *научно-исторический* (работы научно-исследовательских институтов, научных лабораторий и отдельных лиц; материалы по истории светотехники, литература по светотехнике на всех языках); б) *оптических инструментов, проекционной аппаратуры и измерительных приборов* (аппаратура научная, учебно-вспомогательная и лекционная, а также оптическая, применяемая в науке, технике и промышленности); в) *фотокинетотехнический*; г) *осветительной техники* (источники света, осветительные приборы и системы освещения); д) *рентгеновской аппаратуры и приборов светолечения* и е) *машин для изготовления различных светотехнических приборов и аппаратов и их частей*.

Фасад Политехнического музея со стороны Политехнического проезда, где был главный вход, был богато оформлен большим числом разноцветных источников света; там была установлена грандиозная светящаяся панель, сама по себе являвшаяся экспонатом: это была эффектная динамическая цветопеременная светотехническая установка, придававшая особую торжественность выставке уже в самом ее начале, т. е. у входа.

<sup>1</sup> Из воспоминаний члена Выставочного комитета — автора настоящей статьи Л. Д. Белькинда (Ред.).

Первоначально предполагалось, что выставка будет открыта в течение 100 дней. Но успех ее оказался с самого начала столь значительным, что она была открыта дольше и усиленно посещалась с 20 августа по 30 декабря 1927 г. В течение всего этого времени она пополнялась экспонатами. За это время ее посетило 101 374 человека. Это число показывает, что выставка привлекла большое внимание и отвечала запросам широких масс трудящихся.

Общее число экспонентов выставки — 53, а общее число экспонатов — 542. Кроме отдельных экспонатов на выставке функционировала линия конвейерного производства ламп накаливания, работали показательное фотоателье и киностудия.

На первом месте по числу экспонатов и по их значению был Отдел осветительной техники. Государственный электротехнический трест (ГЭТ) весьма полно представил продукцию своих светотехнических заводов. Значителен был также и Отдел оптических инструментов, в котором были широко представлены достижения советской оптико-механической промышленности и научные работы Государственного оптического института и других научных учреждений. Все отделы выставки явились прекрасным и наглядным доказательством важности индустриализации страны и показали, как важна для производства его тесная связь с наукой.

В период Светотехнической выставки была проведена в Москве под председательством проф. М. А. Шателена Первая всесоюзная светотехническая конференция, созданная Научно-техническим отделом Высшего совета народного хозяйства СССР. В работах этой конференции приняли участие светотехники из многих союзных республик, а также физики, оптики, физиологи и гигиенисты. На конференции были заслушаны и обсуждены доклады, приняты Нормы и правила освещения, положено начало координации научных работ по светотехнике путем создания Всесоюзной ассоциации лабораторий осветительной техники (ВАЛОТ).

Иностранные фирмы представили на Выставку около 150 экспонатов, среди которых были почти исключительно высокочастотные и другие светолечебные аппараты и проекционные приборы. Приборов, относящихся к технике освещения, иностранные фирмы не экспонировали, если не считать нескольких переносных дуговых ламп для фотографических съемок и киносьемочных прожекторов. Повидимому, уже тогда зарубежным светотехническим заводам, производящим лампы, осветительную арматуру и прожекторы, было ясно,

что советская промышленность полностью печивает потребности страны в этого рода продукции, причем качество советских светотехнических изделий считалось достаточно высоким.

Во время выставки было прочитано 1 докладов научного и научно-популярного характера; читались лекции также и на заводах, пускались листовки для популяризации техники. Кроме того, Выставочный комитет выпустил три номера специального бюллетеня, в котором давалась информация о ходе выставки; печатались доклады и описания отделов выставки. Главная палата мер и весов выпустила специальный бюллетень, посвященный выставке, изданный в виде приложения к журналу «Техническое дело», № 2/9 за 1927 г.

4 января 1928 г. Экспертный комитет выставки закончил присуждение наград экспонентам (почетных дипломов, почетных аттестатов, грамот и поощрительных отзывов).

Значение выставки было весьма заметно, оно чувствовалось в течение всей первой пятилетки. Для советской науки и техники эта выставка была, несомненно, значительным моментом, давшим сильный импульс как для дальнейшей работы научных проблем светотехники, так для расширения применений света на практике. Выставка, несомненно, способствовала подъему культуры в области светотехники, стимулировала стремление к более совершенному использованию электроэнергии для целей освещения. Более тысячи человек, посетивших выставку, получили наглядное представление о степени развития знаний в области светотехники и оптики. Выставка явилась в высшей степени убедительным методом естественно-научной и технической пропаганды.

Немалое значение имела Светотехническая выставка 1927 г. и в том отношении, что она показала ряд исторических экспонатов: электрические свечи Яблочкова, лампы накаливания Лодыгина, дуговые лампы Чиколева и др.

За четверть века после Первой всесоюзной светотехнической выставки наша страна, выполняя планы сталинских пятилеток, стала первой индустриальной державой. Выросла и по масштабам и по техническим методам и приемам советская светотехника. Многие проблемы светотехнической промышленности, которые в 1927 г. могли представляться посетителям выставки смелой мечтой, давно нами решены и реализованы в советском социалистическом производстве.

*Доктор техн. наук, проф. Л. Д. БЕЛЬКИН*





## К статье Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского „О схемах городских электрических сетей в связи с многоэтажным строительством“

(Электричество, № 12, 1951)

Кандидат техн. наук, доц.  
Б. Л. АЙЗЕНБЕРГ

ЛИЭИ им. Молотова

В статье Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского правильно указана и достаточно обоснована необходимость ухода от существующих несовершенных схем электрической распределительной сети среднего напряжения к более совершенным. Содержащееся в статье предложение повышения надежности электроснабжения потребителей и применения двухлучевой схемы с переплетением магистралей представляет несомненный интерес. В отдельных случаях, когда требуются особо высокая степень надежности и бесперебойность электроснабжения потребителей, применение этой схемы может оказаться целесообразным. Однако принять это предложение в качестве типорешения для всех новых городских сетей было бы неверно.

Рассмотренный в статье новый жилой массив, состоящий из одинаковых кварталов в виде квадратов, отнюдь не является типовым даже для Москвы, не говоря уже о Ленинграде и других городах Советского Союза. При такой компоновке кварталов имеют место существенные различия в этажности домов, в величине электрических нагрузок и их характере, в ширине межквартальных проездов и других параметрах. Поэтому предложенное авторами решение не имеет универсального характера. Произведенные авторами расчеты и сопоставление затрат двухлучевой схемы и замкнутой схемы без сетевых автоматов в части затрат и потерь электроэнергии при низком напряжении и сетевых трансформаторных подстанциях не вызвали бы никаких возражений, если бы была учтена довольно значительная стоимость автоматов при двухлучевом варианте.

При сопоставлении затрат на распределительную сеть среднего напряжения авторы допустили существенную ошибку, рассмотрев лишь приходящуюся на один квартал, в то время следовало бы рассматривать сеть всего жилого массива. Тогда результаты сопоставления были бы совсем иными.

Примем нагрузку квартала равной примерно  $10 \text{ квт}$ , сечение кабеля  $10 \text{ кв} - 3 \times 50 \text{ мм}^2$  и составим три варианта сети: 1) сеть, выполненную по двухлучевой схеме, с одной сетевой трансформаторной подстанцией на квартал (рис. 1, а); 2) сеть, выполненную по замкнутой схеме, с двумя сетевыми трансформаторными подстанциями на квартал (рис. 1, б); 3) сеть, выполненную по замкнутой схеме, с тремя сетевыми трансформаторными подстанциями на квартал (рис. 1, в).

Второй вариант, как это утверждают и авторы статьи, не дает увеличения расхода кабеля по сравнению с первым вариантом. По утверждению Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского о том, что второй вариант сети стоит, бы, вдвое дороже, чем первый, не обосновано совершенно. Увеличение затрат кабеля при третьем варианте по сравнению с первым будет очень значительным.

При прокладке кабеля в блоках сеть, выполненная по схеме рис. 1, б или рис. 1, в, будет стоить дороже сети, выполненной по схеме

рис. 1, а. Удорожание произойдет за счет большей стоимости строительных работ, но отнюдь не за счет увеличения затрат цветного металла.

Сеть с двумя сетевыми трансформаторными подстанциями на квартал, из которых одна двухтрансформаторная, а другая одноподстанционная, может быть выполнена по замкнутой схеме без сетевых автоматов (рис. 2). Избирательность защиты при этом обеспечивается с помощью одной серии плавких вставок.

Затраты на сеть  $10 \text{ кв}$  при варианте 2 (рис. 1, б) и при варианте 1 (рис. 1, а) одинаковы. Затраты же на сеть низкого напряжения и на сетевые трансформаторные подстанции при варианте рис. 2 составят  $103,9 \text{ тыс. руб.}$ , а годовые потери энергии —  $63\,400 \text{ квт} \cdot \text{ч}$  т. е. меньше, чем при

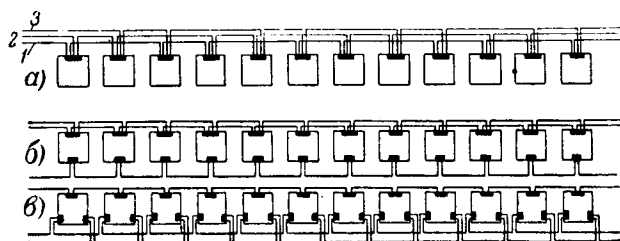


Рис. 1. Схема распределительной сети среднего напряжения.

а — двухлучевая схема сети; в каждом квартале одна сетевая трансформаторная подстанция с двумя трансформаторами по  $320 \text{ кв} \cdot \text{а}$ ; б — замкнутая схема сети без сетевых автоматов; в каждом квартале две сетевые трансформаторные подстанции, из которых одна с двумя трансформаторами по  $180 \text{ кв} \cdot \text{а}$ , а другая с одним трансформатором  $180 \text{ кв} \cdot \text{а}$ ; в — замкнутая схема сети без сетевых автоматов; в каждом квартале три сетевые трансформаторные подстанции с трансформаторами по  $180 \text{ кв} \cdot \text{а}$ .

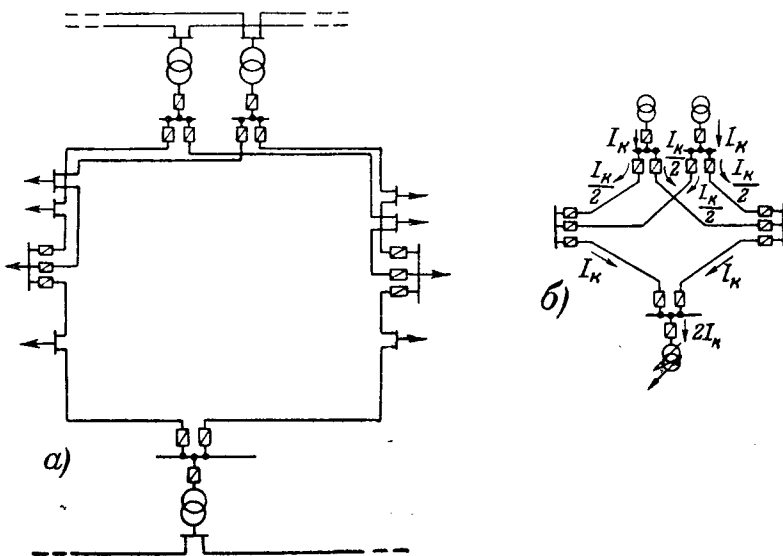


Рис. 2.

а — замкнутая схема сети без сетевых автоматов; в каждом квартале две сетевые трансформаторные подстанции, из которых одна с двумя трансформаторами по  $180 \text{ кв} \cdot \text{а}$  и другая с одним трансформатором  $180 \text{ кв} \cdot \text{а}$ ; б — распределение токов при коротком замыкании в сети среднего напряжения; избирательность защиты обеспечивается одной серией плавких вставок.



двухлучевой схеме рис. 1,а (см. табл. 1 и 2 статьи Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского). При этом не учитывается, что стоимость предохранителей гораздо меньше стоимости автоматических переключающих устройств, не проверенных еще в длительной эксплуатации.

В работе Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского имеется ряд неверных утверждений.

Нет никаких оснований считать, что обслуживание двухсекционной трансформаторной подстанции со сложной автоматикой на стороне низкого напряжения дешевле обслуживания двух расположенных на расстоянии 100 м друг от друга однострансформаторных подстанций без автоматики.

Обоснование отказа от распределительных пунктов среднего напряжения мало убедительно; в частности, непонятно, почему нагрузка питающих такой пункт линий неравномерна. В Ленинградской кабельной сети питающие линии работают параллельно, и никакого увеличения потерь в сети из-за неравномерности их нагрузки не наблюдается.

Непонятно, как может работать автоматика соединительного пункта в схеме, показанной на рис. 13 статьи, при повреждении одного из двух направлений. Вряд ли магистраль низкого напряжения сможет питать всю нагрузку повредившегося направления через обратную трансформацию.

В большинстве существующих городских сетей, имеющих однострансформаторные сетевые подстанции, осуществить переход на двухлучевую схему гораздо труднее, чем на замкнутую схему без сетевых автоматов.

Однако приведенные замечания не уменьшают несомненной практической ценности работы Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского. Следует особо подчеркнуть два следующих весьма существенных положения, выдвинутых ими:

1. Сеть повышенной надежности (двухлучевая и замкнутая без сетевых автоматов) не только не требует больших затрат кабеля низкого и среднего напряжения, электрооборудования, трансформаторной мощности, но позволяет лучше использовать медь кабелей распределительной сети среднего напряжения, чем существующая петлевая сеть и разомкнутая сеть низкого напряжения. Это положение по установившейся традиции оспаривалось и продолжает без сколько-нибудь серьезных оснований оспариваться многими проектировщиками и работниками эксплуатации.

2. В случае питания сети от двух районных подстанций или станций применение двухлучевой схемы может обеспечить более высокую надежность электроснабжения потребителей, чем применение замкнутой схемы без сетевых автоматов. Поэтому в тех случаях, когда к надежности работы электросети предъявляются особо высокие требования, двухлучевая схема найдет себе применение даже и при более высокой стоимости такой сети.

**Кандидат техн. наук Н. В. ВОЛОЦКОЙ**

**Ленпроект**

Дублирование трансформаторов и кабелей среднего напряжения, а также автоматическое включение резерва широко применяются в схемах электроснабжения ответственных промышленных и других подобных им потребителей. В своей статье Э. С. Иохвидов и Г. В. Сербиновский считают целесообразным применить такую схему под названием двухлучевой и для городской кабельной сети.

Все расчеты и выводы сделаны авторами применительно к некоторому условному квадрату, застроенному жилыми домами повышенной этажности (8...14 этажей). Площадь квадрата  $120 \times 120 \text{ м}^2$ , а разрыв между квадратами 60 м. Судя по размерам, такой квадрат является одним зданием повышенной этажности. Следовательно, сеть низкого напряжения является внутридомовой сетью и не относится к городской сети. В таком случае применение радиальной сети низкого напряжения и дублирование кабе-

лей в сети среднего напряжения не могут вызывать ражений.

Однако кварталы большинства наших городов: ваются многоэтажными домами высотой 7 и ниже. Стороны таких кварталов получаются равными 300 а число домов в квартале 15...20. В этих условиях низкого напряжения имеет значительную протяженность с авариями в ней нельзя не считаться. Замкнутая повышает надежность работы сети низкого напряжения позволяет отказаться от дублирования кабелей (напряжения).

Технико-экономические показатели различных сетей мощностью 6500 квт в одном из районов строительства Ленинграда, полученные в результате расчетов, приведены в таблице<sup>1</sup>. Эти показатели для сети низкого напряжения, сеть среднего напряжения и сетевые трансформаторные подстанции.

Показатели	Замкнутая схема в виде тре- угольников	Замкнутая схема в виде сетки	Две лучевые
Длина кабеля, % . . . . .	100	109	1
Расход приведенного к меди цветного металла, %	100	82	1
Общая стоимость, % . . . .	100	99	1
Единичная мощность сетевой трансформаторной подстанции, квт . . . . .	$1 \times 320$	$1 \times 320$	$2 \times 160$

Данные таблицы показывают, что двухлучевая схема по сравнению с замкнутой схемой в виде сетки имеет преимущества по расходу цветных металлов и является самой дорогой. Если к этому добавить ненадежность двухлучевой схемы в части сети низкого напряжения, строящейся по радиальной схеме, без резерва, невозможность проведения текущего и профилактического ремонта секционных автоматов без отключения всей трансформаторной подстанции, недостаточность использования трансформаторной мощности, то станет очевидным, что для домов, застраиваемых домами в 7 и ниже этажей, применять двухлучевую схему не следует. Область применения этой схемы — мощные одиночные потребители, к которым относятся и жилые дома повышенной этажности (более 7 этажей), стоящие на значительном расстоянии друг от друга.

Ряд положений статьи Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского вызывает возражения. Сравнение вариантов с одной, двумя и тремя трансформаторными подстанциями при суммарной мощности 480 квт вызывает удивление. Совершенно очевидно, что при больших плотностях нагрузки (в данном примере они предельно высоки) трансформаторы мощностью 100 квт явно невыгодны. Сравнение вариантов сети с незначительной суммарной мощностью вообще не имеет смысла, и результаты такого сравнения не могут быть обобщены.

Цены, принятые для экономических расчетов, завышены; очевидно, не учтена строительная стоимость встроенных трансформаторных подстанций. Стоимость включения резерва, включая сюда 6 пар контакторов 600 а со всеми дополнительными приспособлениями и монтажом, принята равной 3...4 тыс. руб. сильно преувеличена. Если учесть эти поправки, то применение вариантов будет не в пользу двухлучевой схемы.

Несмотря, однако, на эти возражения, двухлучевая схема является одной из возможных рациональных схем городской электросети, обеспечивающей повышенную надежность электроснабжения зданий с числом этажей 7. Но она не может быть рекомендована при застройке города домами в 7 и ниже этажей.

<sup>1</sup> Расчеты выполнены И. Ф. Кузнецовым.

## УСПЕХИ СОВЕТСКОЙ РАДИОТЕХНИКИ

Радио в СССР — могучий двигатель культуры. В нашей стране — на родине радио — созданы все условия для непрерывного роста темпов развития радиофизики, радиотехники и электроники, для непрерывного совершенствования аппаратуры и радиоматериалов, для количественного и качественного роста радиосвязей.

Огромная протяженность территории Советского Союза требует совершенной и высоконадежной системы радиосвязи. Начиная с 1951 г., внутриобластные линии радиосвязей вводятся на систему частотной манипуляции. Электронные лампы с питанием катодов переменным током позволяют создать новый тип радиовещательных передатчиков. Мощность ламп увеличивается благодаря применению специальных тиристорных выпрямителей, плавно поднимающих напряжение на анодах ламп. Новые возбудители для радиовещательных диапазонов обеспечивают стабильность частоты, превосходящую международные нормы. Для усиления и контроля частот радиостанций с амплитудной частотной модуляцией создано устройство, позволяющее варьировать частоты до 60 мГц с точностью, большей чем  $10^{-7}$ . Впервые в мире у нас разработан новый прибор измерения нелинейных искажений во время передачи. Непрерывно проводится работа по созданию высококачественных радиоматериалов и деталей. Новые типы бутербродных конденсаторов, разработанных в СССР, самовосстанавливаются после пробоя; новые непроволочные сопротивления имеют в пять раз меньший объем, чем углеродистые сопротивления; начальная магнитная проницаемость нового типа магнитных феррокерамических материалов может изменяться в больших пределах (10...2000), а удельное сопротивление ферритов в миллионы раз больше, чем у обычных мягких магнитных материалов.

Выпуск в СССР радиоприемников в 1951 г. увеличился по сравнению с последним предвоенным годом в 8 раз. Для приема радиоприемников в районах, не имеющих электросетей, разработан довольно простой термогенератор (с использованием для выработки электроэнергии тепла обычной керосиновой лампы). Количество абонентских точек в сельских районах за 1951 г. увеличилось на 193%, а в целом по стране более чем на 30%. В опытную эксплуатацию сдается станция многоспрограммного вещания по трансляционным линиям.

Новой совершенной аппаратурой снабжены Московский, Ленинградский и Киевский телевизионные центры. Разработан типовой компактный, несложный в монтаже, экономичный в эксплуатации телевизионный центр для крупных областных городов. Создана новая модель массового телевизионного 17-лампового приемника с трубкой с электростатическим отклонением и фокусировкой электронного луча; применение такой трубки не только упрощает конструкцию телевизора, облегчая его вес в сравнении с ВН-49 на 10 кг и уменьшает потребляемую мощность на 150 Вт, но, кроме того, освобождает от появления на экране трубки так называемого ионного пятна, которое постепенно образуется в центре экрана трубок с электронным отклонением луча в виде плотного темного пятна диаметром до 50 мм.

Для установки в клубах, в санаториях и т. д. разработан экспериментальная модель телевизора с экраном 4 м.

Бурными темпами развивается в СССР массовое радиотелиграфическое дело. Большую помощь в этом направлении оказывают массовые серии радиотехнической литературы.

(Академик А. И. Берг, «Радио», № 8, 1952)

## ОПОРЫ УЛИЧНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ ИЗ АСБОЦЕМЕНТНЫХ ТРУБ

При устройстве наружного электрического освещения в г. Белгороде вместо металлических опор используют опоры, изготовленные из отходов асбоцементных труб. Конструкция эта появилась в результате конкурса, организованного среди работников электрохозяйства города с целью изыскания материалов, могущих заменить металл. Опора состоит из трех кусков трубы различного диаметра, вставленных одна в другую, с частичным заполнением щебенкой и соединением при помощи раствора. Для художественной отделки стыков применяются деревянные двухступенчатые обжимки, а для оформления применены кирпичи. После закрепления арматуры производится окраска, придающая опорам красивый металлический вид. Общая высота опоры 6,5 м.

(М. Ф. Фоменко, Жилищно-коммунальное хозяйство, № 3, 1952)

## ЗА РУБЕЖОМ

### ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИГНИТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Игнитронные выпрямители зарекомендовали себя как лучший тип выпрямителей с жидким катодом. Ниже описываются высоковольтные игнитронные выпрямители двух типов: мощностью 2500 и 7500 кВт, оба напряжением 17000 в, в которых используются запаянные игнитроны на 50 и 150 а соответственно.

Эти выпрямители могут применяться в качестве источников питания радиопередатчиков, для преобразования частоты в энергетических установках, для ускорения элементарных частиц, для высоковольтных испытаний и т. д.

В обоих типах выпрямителей принята трехфазная двухтактная схема, приводящая к шестикратной периодичности. Выпрямитель 2500 кВт состоит из 5 шкафов шириной 75 см, глубиной 120 см и высотой 225 см каждый. В трех шкафах размещены игнитроны (один над другим) с аппаратурой, в четвертом — аппаратура управления, пятый — для аппаратуры постоянного тока. Выпрямитель 7500 кВт состоит из четырех шкафов размером 180 × 150 × 225 см; три из них для игнитронов, четвертый для аппаратуры управления.

Оба типа выпрямителей имеют почти одинаковые схемы возбуждения. Охлаждение выпрямителей водяное. Температура воды автоматически регулируется в пределах 35...45°C.

На рис. 1 показан разрез игнитрона 50 а, 20 кВ выпрямителя 2500 кВт. Диаметр баллона около 14 см, высота 55 см. Вес игнитрона около 10 кг. Конструкция почти такая же, как и низковольтных запаянных игнитронов, за исключением сеток. Игнитрон имеет, кроме управляющей, еще одну сетку, названную градиентной. Эта сетка расположена между управляющей сеткой и анодом и управляет распределением потенциала между анодом и катодом во время непроводящей части периода, обеспечивая высокую электрическую прочность вентили.

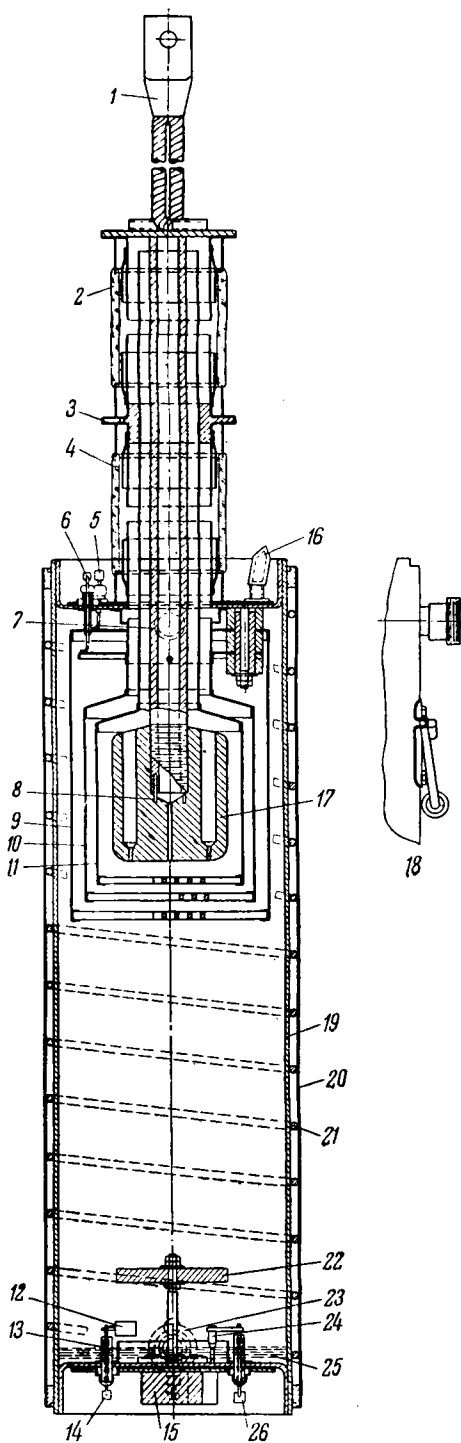


Рис. 1. Разрез игнитрона на 150 а, 20 кв.

1—вывод анода; 2—изоляционная втулка; 3—вывод градиентной сетки; 4—изоляционная втулка; 5—вывод экранной сетки; 6—вывод управляющей сетки; 7—выход воды; 8—шпилька; 9—экранная сетка; 10—управляющая сетка; 11—градиентная сетка; 12—анод возбуждения; 13—кольцо; 14—вывод анода возбуждения; 15—вывод катода; 16—вакуумная отпайка; 17—анод; 18—вид на регулятор впуска воды; 19—внутренний цилиндр; 20—внешний цилиндр; 21—змеевик охлаждения; 22—экран от ртутных капель; 23—вход воды; 24—зажигатель; 25—ртуть; 26—вывод зажигающего.

Игнитрон на 150 а имеет три сетки: экранную, расположенную ближе всех к катоду, управляющую и градиентную. Экранная сетка способствует быстрой деионизации плазмы немедленно после окончания проводящей части периода. Назначение остальных сеток такое же, как и в 50-амперном игнитроне. На рис. 2 показан общий вид такого игнитрона.

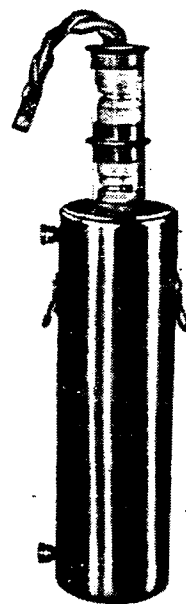


Рис. 2. Общий вид игнитрона 150 а, 20 000 в.

Диаметр баллона вентиля 22,5 см, высота 105 см. Игнитрон имеет управляющую и экранную сетки во время непроводящей части периода подается отрицательный (относительно катода) потенциал. Потенциал градиентной сетки положительный, равный 50 ... 65% от анодного. Оба типа игнитронов имеют 30-кратную мгновенную перегрузочную способность.

На рис. 3 показана схема силовых и контрольных цепей выпрямителя. Вторичная трехфазная обмотка главного трансформатора присоединяется в трех точках к шинам игнитронов. Цепи управления питаются от отдельного вспомогательного трансформатора. Любая из шин переменного тока может быть (если это необходимо) заземлена. Обе шины заземляются с помощью рубильника, перед тем как открыть дверцы любого шкафа.

Ко вторичной обмотке главного трансформатора присоединен RC фильтр, предохраняющий обмотки от перенапряжений при коммутации тока от баллона к баллону. Фильтр настроен на критическое демпфирование и потребляет около 3,5 квт (для выпрямителя 2 500 квт).

Цепи возбуждения питаются от шин управления через трансформатор фазорегулятора — фазорегулятор — шунт фазорегулятора и разделительные трансформаторы. Последних имеется 6 — по одному на каждый игнитрон.

Фазорегулятор обеспечивает регулирование фазы в пределах до 150°, что позволяет получить плавное изменение выходного напряжения от 0 до 100%.

Применение разделительных трансформаторов обеспечивает электрическую изоляцию цепей, имеющих потенциал земли, от цепей, соединенных с шинами высокого напряжения.

Отличительной особенностью является то, что в данной схеме управляющая сетка получает импульс, отпирывающий вентиль только после того, как зажигающий вызывает появление катодного пятна.

Это предохраняет игнитрон от порчи, которая могла бы случиться, если бы такой импульс мог появиться на сетке при случайном отказе зажигающего. Градиентная сетка получает потенциал от средней точки потенциометра, включенного между анодом и катодом.

Все элементы и их цепи, естественно, распределяются на 3 группы: одна, имеющая потенциал земли, и две другие, имеющие потенциал катодов соответствующих двух игнитронов. Каждый из игнитронов с элементами своей группы смонтирован так, что они все изолированы от корпуса шкафа. Обе сборки с игнитронами размещены рядом. Общий вид одного шкафа показан на рис. 4.

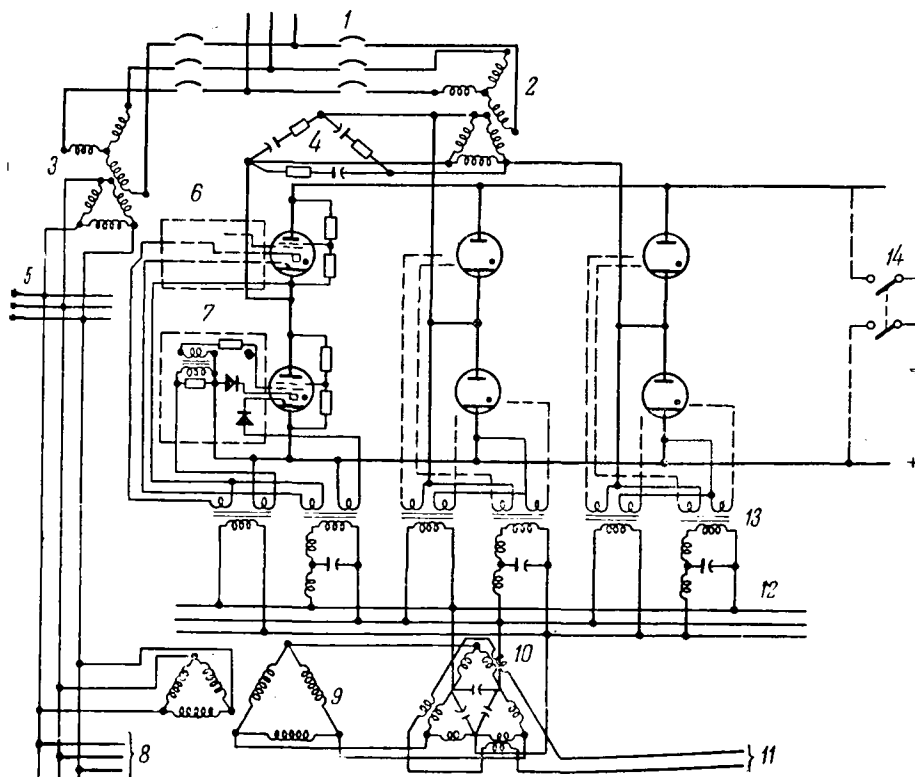


Рис. 3. Принципиальная схема высоковольтного инверсионного выпрямителя.

1—шины переменного тока; 2—силовой трансформатор; 3—вспомогательный трансформатор; 4—фильтр; 5—шины цепей управления; 6, 7—цепи с током; 8—провода к вспомогательным цепям; 9—трансформатор фазорегулятора; 10—фазорегулятор; 11—цепь управляющего тока; 12—цепь зажигания; 13—разделительные трансформаторы; 14—заземляющий рубильник.

Разделительные трансформаторы, элементы схемы зажигания и патрубки (водяного охлаждения) смонтированы на днище шкафа. Сеточная аппаратура смонтирована в полностью экранированных ящиках, что предохраняет от наведения посторонних э. д. с.

Для изоляции водяных рубашек инвертионов от заземленной системы водяного охлаждения они присоединяются к трубам системы посредством изоляционного шланга, а вода применяется дистиллированная, циркулирующая замкнутой системе со скоростью 81 л/мин в выпрямителе 2500 квт и 135 л/мин в выпрямителе 7500 квт.

Расход свежей воды равен 45 л/мин для обоих типов выпрямителей.

Выпрямители снабжены устройствами для быстрого подогрева воды перед пуском. Инвертионы также снабжены подогревателями, обеспечивающими более высокую температуру анодов и сваренных мест баллона по сравнению с температурой соседних частей. Подогреватели выпрямителя 2500 квт смонтированы на дверцах шкафов в рефлекторах. Подогреватели выпрямителя 7500 квт смонтированы непосредственно над баллонами инвертионов. Двери всех шкафов с аппаратурой и шинами высокого напряжения (переменного и постоянного) снабжены блокировкой, которая обеспечивает невозможность отпирания двери любого шкафа, пока не отключен выпрямитель и не заземлены шины постоянного тока.

Релейная аппаратура выпрямителей обеспечивает правильную последовательность включения цепей при пуске, обеспечивает пуск выпрямителя при температуре баллонов вне нормально допустимых пределов и при не включенных подогревателях анодов инвертионов.

Следует отметить, что по сообщению Главного управления электрификации железных дорог высоковольтные инверсионные выпрямители отечественного производства были введены в нормальную эксплуатацию на электрифицированных железных дорогах СССР в 1945 г. Это подтверждает их приоритет в данной отрасли техники.

(М. J. Mulhern. AIEE, Transactions. т. 69, ч II, стр. 913, 1950)

Инж. Э. Г. УДЕРМАН

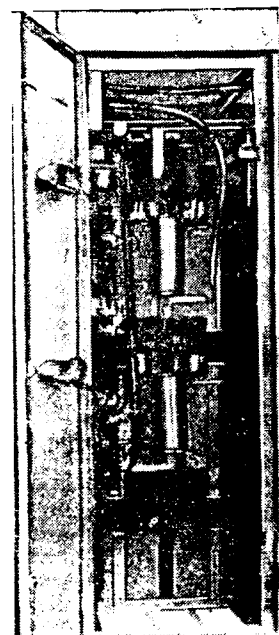


Рис. 4. Внутренний вид шкафа с инверсионной установкой на 2500 квт и 17000 в, работающей от трехфазной линии 13,8 кв.

## СЕРДЕЧНИКИ ИЗ ХОЛОДНОКАТАННОЙ СТАЛИ ДЛЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Применение электротехнической холоднокатанной стали высокой проницаемости (сталь ХВП) для сердечников трансформаторов имеет, как известно, ряд особенностей, связанных с резко выраженным ориентированным характером ее кристаллической структуры. Из кривых рис. 1 и 2 видно, как удельные потери для этой стали и н. с. на единицу длины зависят от угла отклонения вектора магнитной индукции от направления проката стали. Совершенно очевидно, что для наиболее полного использования

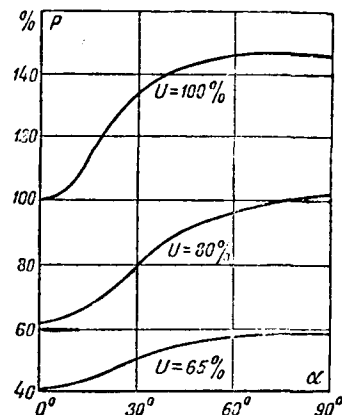


Рис. 1. Потери в стали ХВП в функции угла отклонения вектора индукции от направления проката.

P—потери в стали, %; α—угол отклонения от направления проката.

магнитных свойств стали необходима такая конструкция сердечника, которая на всем протяжении магнитных силовых линий обеспечивала бы их совпадение с направле-

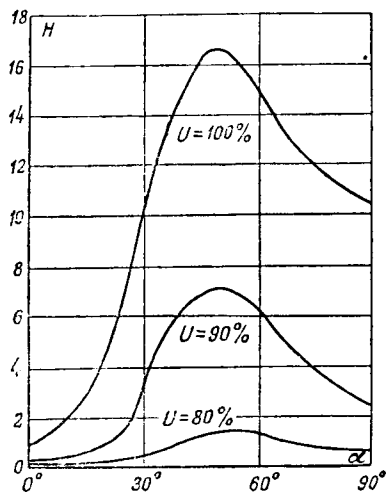


Рис. 2. Намагничивающая сила на единицу длины для стали ХВП в функции угла отклонения вектора индукции от направления проката.

$H$  — намагничивающая сила на единицу длины;  $\alpha$  — угол отклонения от направления проката.

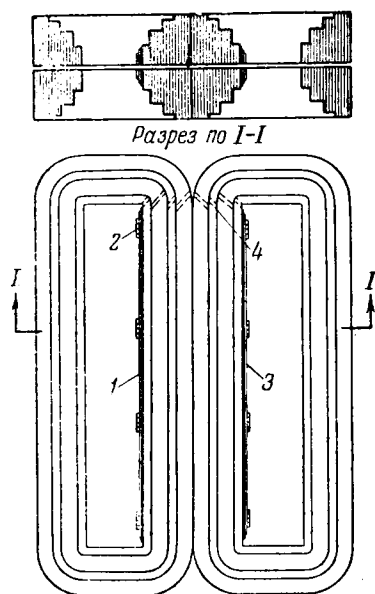


Рис. 3. Устройство сердечника, состоящего из четырех частей.

1 — изолирующая усиливающая пластина; 2 — изолирующий хомут; 3 — усиливающая пластина; 4 — зона стыков.

нием проката стали. Наилучшим образом этому требованию удовлетворяют применяемые для этой цели сердечники, намотанные из полос стали ХВП. Однако такая конструкция, требующая вматывания обмотки в готовый сердечник или, наоборот, вматывания сердечника в готовые обмотки, практически применима лишь для распределительных трансформаторов малой мощности.

Для силовых трансформаторов средней мощности (сотни и несколько тысяч киловольтампер) применяется конструкция сердечников, аналогичная обычной, т. е. набираемой из отдельных пластин стали, но не с прямыми, а со скошенными стыками между листами одного слоя. Очевидно, что в этой конструкции лишь частично разрешается вопрос наилучшего использования магнитных свойств стали ХВП, так как, несмотря на скошенные стыки в углах сердечника, все же имеет место отклонение век-

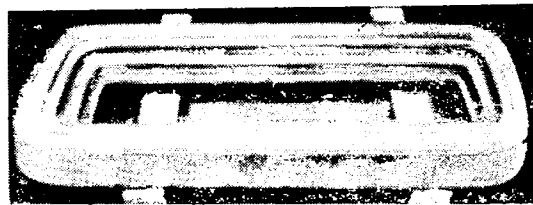


Рис. 4. Четвертая часть однофазного намотанного сердечника.



Рис. 5. Намотанный сердечник в процессе сборки трансформатора.

Обмотки уже насажены на стержень. Для их насадки были отогнуты стальные полосы, опирающиеся на подставку. Справа часть полосы вновь пригнута в свое окончательное положение.

тора индукции от направления преобладающей ориентации кристаллов стали.

Сталь ХВП выпускается американской промышленностью не в виде листов, как горячекатанная кремнистая сталь, а в виде полос определенных ширины и сравнительно большой длины, которые и используются в описываемой ниже конструкции однофазных сердечников для силовых трансформаторов.

Естественно, что конструкция сердечника должна не только отвечать требованию совпадения направления магнитного потока с направлением проката стали, но должна, кроме того, удовлетворять и ряду других требований, как то: ступенчатая форма поперечного сечения стержня, приближающаяся к круглой форме цилиндрических обмоток, наличие охлаждающих каналов для более точного полного отвода тепла, генерируемого в сердечнике, и др.

На рис. 3 показано принципиальное устройство такого одностержневого однофазного сердечника с двумя горизонтальными и двумя боковыми вертикальными частями, состоящего из четырех отдельных частей.

Для получения необходимых магнитных свойств намотанного сердечника был разработан специальный метод производства, позволяющий строить такие сердечники для трансформаторов мощностью до 3300 кВА. При этом в каждый «виток» стали получается лишь по одному стыку.

Начиная от крайнего внутреннего витка стали и до крайнего наружного витку, длина отдельных полос пропорционально возрастает. Если, таким образом, горячечно распрямить все полосы и сложить их друг на друга, то они образуют бы трапециевид с одной прямой угольной стороной. Такие ступенчатые по длине полосы стали изготавливают путем резки длинной полосы на специальных ножницах, заранее установленных на определенное приращение длины после каждого удара. Вместо этого на отрезанные полосы наносится изоляционный слой, после чего их собирают пакетами, придают им квадратную форму, из которой далее выгибают необходимую прямоугольную форму. Затем следует отжиг, после которого сердечник сохраняет приданную ему форму. На рис. 4 показана четвертая часть описываемого сердечника после отжига. Из четырех таких частей собирается затем весь сердечник.

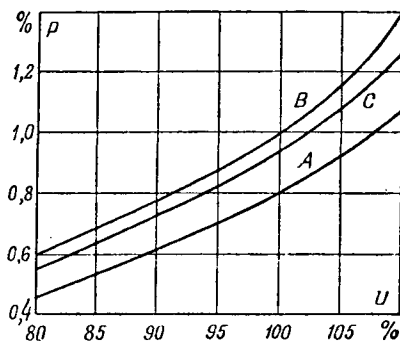


Рис. 6. Потери в стали в функции приложенного к обмотке трансформатора напряжения для различных конструкций сердечников.

$\rho$  — удельные потери в стали;  $U$  — напряжение, %.

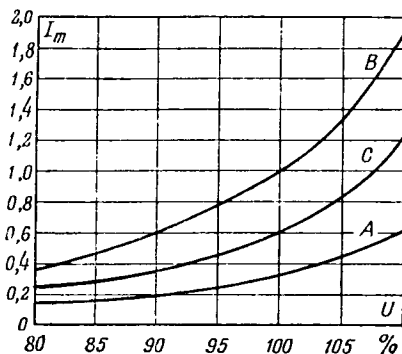


Рис. 7. Намагничивающий ток в функции приложенного к обмотке трансформатора напряжения для различных конструкций сердечников.

$I_m$  — удельный намагничивающий ток;  
 $U$  — напряжение, %.

Для насадки обмоток на стержень сердечника отдельные боковые ярем осторожно отгибаются и в отогнутом положении поддерживаются специальной стойкой (рис. 5). Необходимо соблюдать осторожность и избегать изгибов в стали, превосходящих предел упругости, как в противном случае была бы нарушена структура и ухудшены ее магнитные свойства. После намотки обмоток отдельные полосы (слои) стали последовательно вновь пригибаются в свое окончательное положение, в котором они проходили отжиг (рис. 5, справа). Уты, накладываемые вокруг каждой четверти сердечника, обеспечивают плотность стыков, отсутствие чрезмерных вибраций и гудения. Окончательная прессовка осуществляется с помощью вертикальных и горизонтальных стержней яремных балок (консоль).

На рис. 6 и 7 приведены кривые потерь в стали и намагничивающего тока при частоте 60 Гц в функции приложенного к трансформатору напряжения для трансформатора одной мощности, но для трех различных конструкций сердечников из стали ХВП, а именно:

Кривая А. Намотанный сердечник вышеописанной конструкции.

Кривая В. Сердечник, собранный из отдельных прямых пластин (обычная шихтованная конструкция). Кривая С. Сердечник, собранный из отдельных пластин со стыками, скошенными под углом 45°.

Из кривых следует, что в сердечнике описанной конструкции потери в стали составляют 80%, а намагничивающий ток 35% от тех же величин для обычной шихтованной конструкции с нескошенными стыками. Вместе с тем необходимо отметить, что описанная конструкция сердечника с производственной точки зрения, несомненно, имеет ряд трудностей, из которых вытекает опасность, что недостаточно тщательной сборке, связанной с отгибанием полос стали, значительная часть достигнутых преимуществ может быть потеряна. При этом необходимо также учитывать ремонт трансформаторов в эксплуатационных условиях, связанный со снятием обмоток.

(Т. D. Gordy, G. G. Sommerville. AIEE Trans., стр. 1:84, т. 70, ч. I, 1951)

Инж. А. Г. КРАЙЗ

## КООРДИНАЦИЯ МЕСТА УСТАНОВКИ РАЗРЯДНИКОВ С УРОВНЕМ ИМПУЛЬСНОЙ ПРОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Максимально допустимые расстояния между разрядником и защищаемой аппаратурой, в частности трансформатором, зависят от ряда факторов, и не все факторы изучены с достаточной полнотой. Опубликованные за последнее время исследования не всегда согласуются вследствие различного подхода к разрешению вопроса и различной оценки отдельных приводящих моментов. Результаты, полученные в описываемой работе, базируются на экспериментальном исследовании, в основу которого была положена тупиковая подстанция, подход к которой на длине 1...2 км защищен от прямых ударов молнии тросом (рис. 1). Шины подстанции рассматриваются как непосредственное продолжение линии с расстоянием  $s$  между точкой присоединения разрядника к шине или линии и вводом трансформатора. Исследования проводились с использованием схемы замещения, в которой трансформатор был представлен эквивалентной входной емкостью  $C$ . В основу была положена волна с косоугольным фронтом. За условную единицу времени  $F$  во всех случаях принималось отношение максимального импульсного напряжения в месте установки разрядника к крутизне волны. Если  $v$  — скорость движения волны и  $Z$  — волновое сопротивление

линии, то  $\frac{s}{v}$  — время пробега волны от места установки разрядника до трансформатора, а  $Z \cdot C$  — постоянная времени цепи, состоящей из линии и шин с входной емкостью трансформатора на конце.

Полученные результаты в целях их наибольшего обобщения выражены в функции только двух переменных величин:

$$\frac{s}{vF} \text{ и } \frac{ZC}{F}.$$

На рис. 2 приведены в наиболее общем виде полученные в результате исследований отношения максимального напряжения на трансформаторе  $E_r$  к максимальному напряжению в месте присоединения разрядника  $E_s$  в функции двух указанных переменных величин.

Однако при решении вопроса о допустимых расстояниях между разрядником и трансформатором важна не только величина, но и форма кривой напряжения на трансформаторе. Пока нет достаточно обоснованных данных, позволяющих оценить с достаточной точностью влияние формы воздействующего на изоляцию напряжения на прочность последней. Для оценки этого фактора авторы предлагают метод, согласно которому разрушающее действие импульса  $DE$  на изоляцию выражается следующей зависимостью:

$$DE = [e(t) - K_1]^{K_2} dt,$$

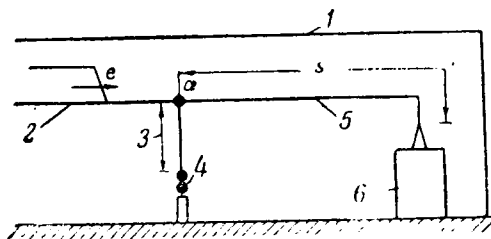


Рис. 1. Принципиальная схема, положенная в основу исследований.

1 — защитный трос; 2 — рабочий провод линии; 3 — соединительный провод между разрядником и линией или шиной; 4 — разрядник; 5 — шина; 6 — трансформатор.

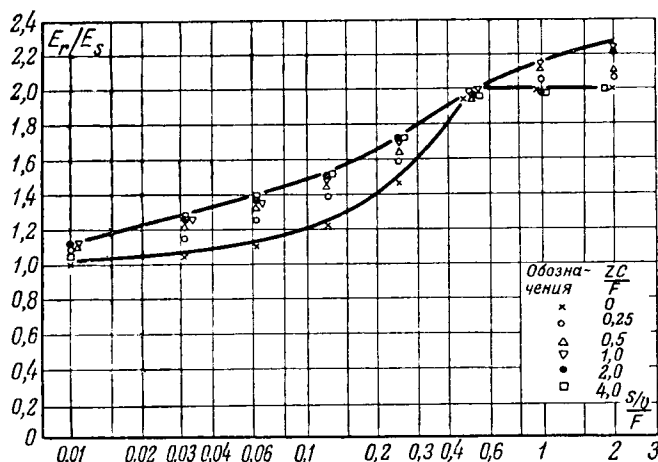


Рис. 2. Максимальное напряжение на трансформаторе.  
 $E_r/E_s$  — отношение максимального напряжения на трансформаторе к напряжению в месте установки разрядника.

где  $e(t)$  — импульсное напряжение в функции времени;  $K_1$  и  $K_2$  — постоянные, величины которых зависят от импульсных испытательных напряжений трансформатора.

$K_1$  — это то постоянное напряжение, которое изоляция трансформатора может выдержать в течение длительного времени без разрушения.

От значения постоянной  $K_2$  зависит относительное влияние в указанном выражении величины и формы импульсного напряжения на разрушающее действие, оказываемое им на изоляцию. Значения постоянных  $K_1$  и  $K_2$  были определены, исходя из стандартизованных импульсных испытаний трансформаторов в предположении, что испытания полной волной, срезанной волной и фронтом волны одинаково жестки. Применение указанного метода позволяет выражать импульсное напряжение с произвольной формой волны через эквивалентную срезанную или полную волну стандартной формы.

Таблица 1

Максимально допустимые расстояния между трансформатором и разрядником при полной изоляции трансформатора

Номинальное напряжение системы, кВ	Уровень изоляции линий, кВ макс		Максимально допустимое расстояние между разрядником и трансформатором, м	
	Деревянные опоры	Стальные опоры	Разрядник с наибольшим допустимым напряжением рабочей частоты $U_p = U_A$	Разрядник с наибольшим допустимым напряжением рабочей частоты $U_p = 0,8 U_A$
34,5	600	—	7	16
69	1 020	—	7	20
	—	600	10	25
115	1 220	—	9,5	33
	—	760	13	40
138	1 380	—	10	29
	—	930	14	38
161	1 490	—	12	26
	—	1 020	16	37
230	—	1 440	18	57

Примечания: 1. Разрядники станционного типа.

2. Длина соединительного провода между разрядником и линией или шиной — не более 10 м.

Далее при координации характеристик разрядника с уровнем прочности изоляции трансформаторов необходимо также учитывать крутизну волны тока в разряднике, которая влияет на величину и форму волны разрядного напряжения. При определении допустимых расстояний между разрядником и трансформатором в основу были положены испытательное напряжение трансформатора при срезанной волне и импульсное пробивное напряжение искровых промежутков разрядника при волне 10/20 мксек. Крутизна набегающих на разрядник волн была принята равной 1,67 кВ/м, а их амплитуда — не превышающей прочности линейной изоляции при времени разряда 3 мксек, что примерно равно напряжению при полной волне, увеличенной на 20%. Напряжение в месте установки разрядника определялось как сумма разрядного напряжения разрядника, напряжения в соединительном проводе между разрядником и шиной или линией и динамического напряжения в месте соединения (сопротивлением заземления пренебрегали). Новое сопротивление линии было принято равным сопротивлению трансформатора.

Исходя из этих данных, были определены пределы в табл. 1 максимально допустимые расстояния трансформаторов с полной изоляцией и в табл. 2 трансформаторов с пониженной изоляцией.

Таблица 2

Максимально допустимые расстояния между трансформатором и разрядником при пониженной изоляции трансформатора

Номинальное напряжение системы, кВ	Уровень изоляции линий, кВ макс	Основной уровень импульсной прочности трансформатора, кВ макс	Наибольшее допустимое напряжение рабочей частоты на разряднике, кВ	Максимально допустимое расстояние между разрядником и трансформатором, м	
				0	1
115	760	450	99 93	16 23	—
138	930	550	117 111	20 28	—
161	1 020	650	135 129	28 36	—
230	1 440	900	195 183	24 36	—
287	1 610	1 050	243 228	18 24	—
345	1 780	1 300	273	37	—

Необходимо отметить, что предлагаемый в статье метод оценки разрушающего действия импульсов на изоляцию не был подтвержден никакими опытными исследованиями и может рассматриваться лишь как грубое приближение. Следует также указать, что принятые в руководстве значения крутизны волн, превышающие крутизны, рекомендуемые в Руководстве, указывают на защиту от перенапряжений в СССР.

(R. L. Witzke, T. J. Bliss. AIEE Trans., т. 70, ч. 1, стр. 964, 1953)

Инж. А. Г. Край

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ С ХОЛОДНЫМИ КАТОДАМИ

Усовершенствование люминесцентных ламп (трубок) с холодными катодами обеспечило им ряд преимуществ по сравнению с лампами с подогревными катодами, в частности более длительный срок службы, повышенную надежность в работе и другие ценные качества.

В силу того, что лампы с холодными катодами зажигаются от напряжения 750...10 000 в и выше, их часто называют высоковольтными люминесцентными лампами. Лампы с холодными катодами имеют диаметр от 8 до 16 мм и могут изготавливаться любой формы и длины, обычно до 2 м. Катоды могут быть впаяны в трубку в любом положении.

Различают два типа ламп с холодными катодами: лампы с собственно холодными катодами и лампы с окисными холодными катодами.

Принцип работы обоих типов ламп с холодными катодами отличается от работы ламп с подогревными катодами.

Лампы с подогревными катодами. При прохождении а через нить подогревного катода покрывающий его окисный слой эмиттирует первые электроны, которые способствуют возникновению разряда. При наложении определенного напряжения на электроды происходит пробой газового промежутка между ними и при достаточном токе образование дугового разряда.

Температура катодов во время их работы достигает среднего около 900°С. Испускание электронов осуществляется главным образом термоэлектронным путем, и катодное падение напряжения низко. Оно составляет у применяющихся типов ламп примерно 14...18 в.

Лампы при обычных длинах (до 1,5 м) зажигаются от сетевого напряжения. При каждом зажигании в процессе работы лампы происходит выделение из катодного пятна некоторого количества активного материала. В продолжение жизни лампы катодное пятно перемещается от одного конца нити к другому до тех пор, пока активный материал не израсходуется, после чего лампа разрушается. Активный материал выделяется в результате бомбардировки катода положительными ионами. Лампы выходят из строя примерно после 2500 час горения при одном зажигании на каждые три часа работы.

Схема включения ламп с подогревными катодами имеет свои особенности. Для кратковременного нагрева нити катода необходим зажигатель (стартер). Подвод тока к нитям накачивания осуществляется через двухштырьковую вилку. Для получения пика напряжения при зажигании и в качестве стабилизирующего устройства служит балласт.

Лампы с собственно холодными катодами. Разряд в этих лампах возникает без предварительного нагрева катодов. При наложении необходимого напряжения происходит пробой газового пространства происходит мгновенно. Выделение электронов с катодов осуществляется через всю поверхность, и катодное пятно, таким образом, отсутствует. Температура катодов равна примерно 150°С.

В лампах с собственно холодными катодами имеет место тлеющий разряд. Испускание электронов происходит в основном за счет вторичной эмиссии, термоэлектронная эмиссия имеет лишь побочное значение. Катодное падение напряжения составляет 100 в, анодное — около 10...12 в. Номинальный ток ламп с собственно холодными катодами лежит в пределах от 15 до 120 ма. Напряжение зажигания всегда больше 220 в и зависит от количества последовательно включенных трубок и их длины. Верхний предел напряжения зажигания из соображений техники безопасности не должен превышать 10 000 в.

Продолжительность горения трубок с холодными катодами может превышать 50 000 час.

В качестве включающего устройства служит специальный трансформатор с повышенным рассеянием. Отсутствие подогрева катодов исключает необходимость в зажигателе.

Лампы с холодными катодами имеют одноштырьковый цоколь.

Рабочие характеристики ламп дневного света с холодными катодами приведены в таблице.

Лампы с окисными холодными катодами. Катоды этих ламп являются как бы промежуточными между подогревными катодами и собственно холодными катодами.

Лампы с окисными холодными катодами являются лампами дугового разряда с номинальным током от 100 до 700 ма. Зажигание ламп происходит мгновенно благодаря высокому напряжению, получаемому с помощью включающего устройства, в большинстве случаев автотрансформатора.

Диаметр трубки, мм	Ток, ма	Яркость, св	Световой поток на единицу длины после 100 час горения, лм/м	Напряжение на единицу длины, в/м	Мощность на единицу длины, вт/м
25	24	0,10	233	206	4,9
	48	0,17	432	187	8,9
	96	0,36	810	164	15,7
20	24	0,15	262	236	5,6
	48	0,29	520	209	10,2
	96	0,51	980	187	18,0
15	24	0,27	320	295	7,2
	48	0,46	565	265	12,8

Нагрев катодов осуществляется за счет самого разряда. Эмиссия электронов происходит только с одной точки катода, температура которой равна примерно 900°С. Падение напряжения на катоде составляет около 15 в, на аноде — 10...12 в.

При включении ламп с окисными холодными катодами выделения активного материала с катода не происходит, и поэтому продолжительность горения таких ламп не зависит от числа включений.

Электроды. Срок службы зависит главным образом от конструкции электродов.

На рис. 1 и 2 показаны применяемые в настоящее время собственно холодные и окисные холодные катоды, обеспечивающие указанный выше срок горения ламп.

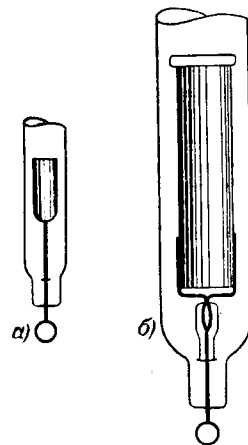


Рис. 1. Холодные катоды.  
а — для тока 15 ма; б — для тока 100 ма.

Холодный катод (рис. 1) представляет собой цилиндр, изготовленный из железа, никеля или алюминия. Размер цилиндра зависит от тока лампы. С торцевой стороны цилиндра защищен от распыления особым защитным колпачком из стекла или керамики.

Окисные холодные катоды (рис. 2) состоят из небольшого цилиндра, изготовленного из чистого железа,

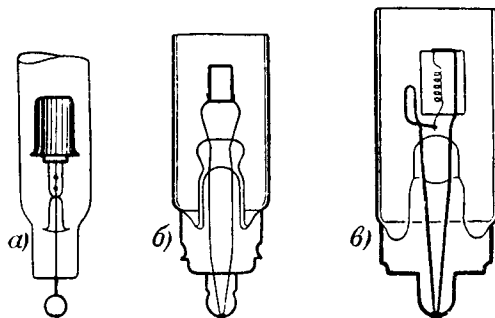


Рис. 2. Окисные холодные катоды (200...700 ма).



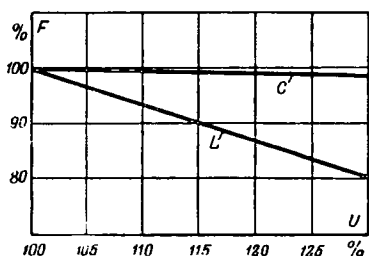


Рис. 3. Уменьшение светового потока ламп с холодными катодами при повышении напряжения в случае индуктивного и емкостного включающего устройства.

C—емкость; L—индуктивность; U—начальное напряжение; F—световой поток, лм.

желательно никелированного. Внутри цилиндра предусмотрено наличие эмиттирующего материала — оксида. Здесь также могут использоваться защитные колпачки из керамики. Большой срок службы ламп с оксидными холодными катодами объясняется тем, что работа лампы продолжается и после израсходования активного материала.

Лампы с оксидными холодными катодами выходят из строя в результате уменьшения светового потока, что вызвано взаимодействием ртуть с люминофором и другими причинами, как, например, повышающимся напряжением на лампе. В последнем случае это зависит также от того, является ли включающее устройство емкостным или индуктивным (рис. 3).

В результате уменьшения светового потока замена ламп, работающих в нормальных условиях, необходима после 10 000 час горения.

Схемы включения ламп с холодными катодами. В новых схемах включения, как правило, используется средняя точка высоковольтной обмотки трансформатора (рис. 4). При этом повышается безопасность эксплуатации установки и, кроме того, при выходе из строя одной из ламп выключается только половина всей системы ламп.

Для увеличения коэффициента мощности параллельно первичной обмотке трансформатора включается конденсатор. Иногда увеличивают число витков первичной обмотки трансформатора в 3...6 раз против нормального для получения повышенного напряжения на конденсаторе, что позволяет применять конденсаторы меньшей емкости (рис. 4, б).

Лампы с оксидными холодными катодами могут зажигаться с помощью специального автотрансформатора с большим магнитным рассеянием, благодаря которому он одновременно выполняет роль стабилизирующего устройства.

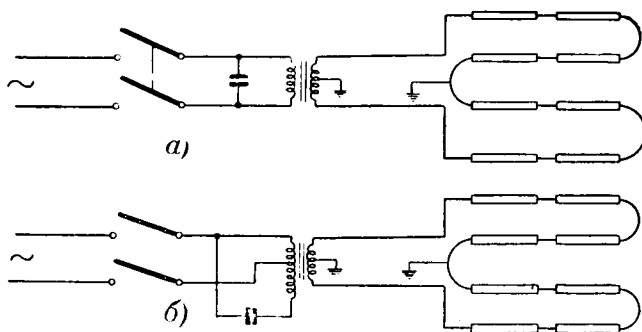


Рис. 4. Схема включения ламп с холодными катодами. а—обычное включение; б—включение с увеличенным числом витков в первичной обмотке трансформатора.

Поскольку для работы ламп с холодными катодами требуется высокое напряжение, необходимо для обеспечения безопасности при обслуживании осветительных установок наличие специальных защитных устройств. Для нормальных осветительных целей применяются специальные светильники, в которых трансформатор смонтирован совместно с лампами.

Светильник сконструирован таким образом, что доступ к трубкам для их замены возможен только при от-

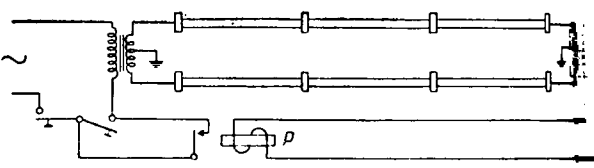


Рис. 5. Схема включения ламп с автоматическим изменением напряжения при замене ламп. ВО—вспомогательная обмотка; Р—реле.

ключенном напряжении. Это может быть осуществлено, например, с помощью вспомогательной обмотки трансформатора, к которой присоединено электромагнитное реле (рис. 5). При разрыве цепи ламп реле автоматически включает первичную обмотку трансформатора.

Другой способ защиты заключается в разрыве первичной цепи трансформатора при открывании крышки тильника.

Для уменьшения стробоскопического эффекта используются те же приемы, что и для ламп с подогревными катодами, например включение ламп в разные фазы.

**Области применения ламп с холодными катодами.** Специфические свойства люминесцентных ламп с холодными катодами определяют следующие возможности их применения.

1. Благодаря большому сроку службы ламп они удобны для освещения помещений, где замена ламп связана с большими трудностями, например высоких помещений фабричных и т. п.

2. В связи с возможностью изготовления ламп любой формы и длины, а также возможностью плавания в трубах в любом положении они с успехом применяются в установках декоративного освещения и для рекламы.

3. Мгновенное включение без предварительного прогрева катодов позволяет применять лампы с холодными катодами для освещения театров, залов для общественных собраний, вокзалов и т. п.

4. Независимость зажигания и работы ламп от внешних условий (температура, влажность) дает возможность применять их в установках наружного освещения, а также в сырых помещениях и в холодильниках.

5. Лампы с холодными катодами не боятся сотрясаний благодаря отсутствию в них нитей накаливания, что позволяет использовать их для освещения специальных производственных помещений, в которых возможны сильные вибрации.

6. При наличии автотрансформатора можно получить различные освещенности от максимума до нуля, изменяя напряжение на лампах. Такие установки удобно применять в кинозалах, демонстрационных залах и др.

Кроме того, светящиеся трубки с холодными катодами с успехом могут быть применены в виде источников белого и цветного света для осуществления фотохимических реакций, для копировальных аппаратов, ретушных столов других специальных целей.

В качестве недостатков ламп с холодными катодами можно указать на следующие:

1. Необходимость устройства специальных защитных приспособлений в установках в связи с наличием высокого напряжения.

2. Более высокая установочная стоимость по сравнению с лампами с подогревными катодами.

Однако расчеты показывают, что благодаря большому сроку службы ламп с холодными катодами и их экономичности установки с такими лампами требуют меньших эксплуатационных расходов по сравнению с установками с лампами накаливания и в конечном счете могут быть выгоднее.

(О. Herbatschek, E. und M., '68, № 15/16, 1951; W. Cruber, Bulletin ASE, № 5, 1952)

Инж. В. И. ДОЛГОПолов, инж. Н. Г. ПЕТРОВ,  
инж. Л. Н. ПОЖАЛКИН.

# а строительстве крупнейших волжских гЭС пятой пятилетки

Гигант гидротехнического строительства пятой пятилетки — Куйбышевгидрострой вступает в третий год своего существования. 21 августа 1950 г. было опубликовано постановление правительства о строительстве Куйбышевской гЭС на Волге — величайшей гидроэлектростанции в мире.

За два года строители Куйбышевской гЭС выполнили огромный объем подготовительных работ и сделали уже много по развертыванию основных работ; при этом составлены планы и графики строго выдерживались.

Строительство в полном разгаре. Со всех концов страны и ночью идут в адрес Куйбышевгидростроя машины, инструменты, материалы. Работы по строительству раскинуты на огромном пространстве за Молодецким курганом. Плоская плотина должна быть воздвигнута от горы Моховой через Волгу и приволжскую пойму в сторону левого берега в район города строителей — Комсомольска. Но не только в этом районе виден напряженный труд строителей; и в районе от основной стройплощадки работы идут полным ходом: дорожники прокладывают новые пути, геологи проводят последние исследования, геодезисты намечают трассы будущих каналов, десятки специалистов заняты подготовкой к орошению заволжских земель и расширением защитных полос.

Первый год на строительстве (1951 г.) был годом создания производственно-технической базы и жилищно-бытовых объектов. Свыше 70 000 м<sup>2</sup> новой жилой площади построено и заселено в 1951 г. рабочими и инженерно-техническим персоналом. 216 км новых высоковольтных линий с переходом через Волгу смонтировано и введено в эксплуатацию. Проложено 162 км новых железнодорожных путей; по ним на площадку непрерывно идут по обеим берегам Волги оборудование и материалы. Железная дорога проложена к самому створу будущей плотины.

Второй год — это год широкого развертывания работ по созданию основных гидротехнических объектов строительства. В самом русле реки, у Жигулей, завершено сооружение перемычки первой очереди котлована под электростанцию, а также перемычки вокруг котлована нижнего разводящего канала на левом берегу. Приступлено к сооружению самой протяженной третьей перемычки вокруг котлована железобетонной водосливной плотины и котлована верхнего плуза. Объем земляных работ 1952 г. составит почти 30 млн. м<sup>3</sup> вместо 8 млн. м<sup>3</sup>, выполненных в 1951 г. Больше половины всех земляных работ выполняется в текущем году способом гидромеханизации, как наиболее эффективным, независимым от погоды, от состояния дорог, требующим в 10 раз меньше рабочей силы и в несколько раз темпы работы.

Вступают в строй первые мощные автоматизированные заводы на обоих берегах Волги. Тысячи тонн строительных материалов будут ежедневно поглощать эти заводы. Транспортировка материалов и некоторых видов промывочных грузов решается здесь смело: мощная воздушная канатная дорога с одной стороны Волги протянется вдоль оси банкетки будущей плотины на другой берег, всего на расстоянии 13 км. Около 140 стальных вышек опор будут поддерживать воздушные тросы, по которым в течение всего строительства гЭС будет перебрасываться 15 000 000 т материалов. В русле реки высота опоры будет достигать нескольких десятков метров.

67 км магистральных железнодорожных путей и 43 км трамвайных железнодорожных путей, а также несколько десятков километров автомобильных дорог сооружаются в текущем году сверх того, что построено ранее. Занимаются также крупные работы жилищно-коммунального сектора (в текущем году дополнительно поступит в эксплуатацию 100 000 м<sup>2</sup> жилой площади, две больших школы, несколько детских садов, яслей, три больницы, верный лагерь и дом отдыха).

Строительно-монтажные организации, в том числе специально созданное предприятие «Волгоэлектросетстрой», выполняют ответственные работы по прокладке линий высоковольтной передачи Куйбышев—Москва. От Волги к Москве одновременно от Москвы к Волге прорубаются широкие

просеки для электропередачи. На первых десятках километров трассы уже сооружаются гигантские металлические опоры.

Второй Волжский гигант — Сталинградгидрострой развернул работы ускоренными темпами. По постановлению правительства, опубликованному 31 августа 1950 г., Сталинградская гЭС должна быть введена в действие на полную мощность в 1956 г. Таким образом, значительную часть основных работ по ее сооружению предстоит выполнить в текущей пятилетке.

В 1951 г. на строительстве была выполнена удвоенная против первоначального плана программа работ. Высокие темпы работ, обилие первоклассной техники позволили и в 1952 г. перевыполнить установленный Сталинградгидрострою годовой план.

Подавляющая часть погрузочно-разгрузочных работ, приготовление бетона и растворов и все земляные работы на строительстве механизированы.

Свыше 400 км высоковольтных и низковольтных линий сданы в эксплуатацию. Проложено 25 км железнодорожных путей и 32 км автомобильных дорог.

Вступает в эксплуатацию крупный ремонтно-механический завод и сооружается ряд мощных подсобных предприятий, которые в целом в самое ближайшее время создадут индустриальную базу Сталинградгидростроя. Идет строительство жилых домов (60 000 м<sup>2</sup> жилой площади уже сданы) и культурно-бытовых учреждений.

На строительстве волжских гЭС широко применяются самые совершенные научные методы испытания материалов; это имеет огромное значение, так как сооружения создаются навечно. Хорошо оборудованные лаборатории укомплектованы крупными научно-исследовательскими силами.

На Куйбышевгидрострое и Сталинградгидрострое широко развернулось социалистическое соревнование в честь XIX съезда коммунистической партии. Опубликованный проект директив съезда по пятому пятилетнему плану вызвал в коллективах крупнейших волжских энергетических строительных новых трудовой подъем. Строители прилагают энергичные усилия для выполнения заданий партии и правительства. Чувство законной гордости в связи с достигнутыми за истекшее время успехами не заслоняет у работников Куйбышевской и Сталинградской гЭС внимания к недостаткам, еще имеющимся в организации и в ходе работ. На этих строительствах еще много неиспользованных резервов. С недостаточной производительностью работают мощные машины и механизмы. Расходование материалов ведется еще недостаточно бережливо. В большом числе случаев неудовлетворительно организовано рабочее место каждого строителя. Средства транспорта часто используются нерационально.

Ряд жалоб, особенно на Сталинградгидрострое, продолжает поступать на нерадивое отношение подрядных организаций к своим обязательствам. Недочеты в их работе должны быть устранены как можно скорее. К этому должно быть приковано внимание всех организаций, ведущих работы на крупнейших волжских стройках пятой пятилетки.

Большевистская партия и советское правительство обязывают хозяйственные и строительные организации выполнять планы не только в количественном отношении и не только в установленные сроки, но непременно и на высоком техническом уровне с обеспечением превосходного качества работ и с соблюдением требований экономии и государственной дисциплины.

Помощь, оказываемая научными учреждениями Куйбышевгидрострою и Сталинградгидрострою, еще далеко не достаточна. Ряд вопросов, возникающих в практике строителей гЭС и требующих для своего решения существенного содействия со стороны институтов Академии наук и научно-исследовательских организаций промышленности, не получают достаточно быстрого и ясного разрешения. Выездные бригады ученых не редко дают, находясь на строительстве, обещания, которые затем ими не реализуются в срок. В этом смысле строители крупнейших волжских гЭС вправе требовать от научных работников поменьше декларативных заверений и побольше действительной и своевременной помощи.

## На расширенном пленуме правления МОНИТОЭ, посвященном открытию Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина

3 сентября с. г. в лектории Дворца культуры автозавода имени Сталина состоялся расширенный пленум правления Московского отделения научного инженерно-технического общества энергетиков, посвященный открытию Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина.

В работе пленума приняли участие энергетики автозавода имени Сталина и члены общества из 60 первичных организаций города Москвы и Московской области.

Во вступительном слове председатель МОНИТОЭ академик М. В. Кирпичев познакомил присутствующих с работой, которую проводит МОНИТОЭ по оказанию помощи великим стройкам коммунизма. Как на одном из примеров конкретной помощи, академик М. В. Кирпичев остановился на внедрении ручной электросварки высокоэффективными электродами из порошковой стали на площадке Куйбышев-гидростроя. Метод получил высокую оценку со стороны руководства строительства и стахановцев-электросварщиков. Помимо экономии дорогостоящих материалов и экономии электрической энергии, этот метод весьма облегчает и упрощает труд электросварщика.

Инж. И. И. Кандалов сделал доклад «Волго-Дон — первенец строек коммунизма». Доклад, в котором были подробно охарактеризованы новейшая техника и методы строительства монтажа, примененные при сооружении канала и Цимлянской гидроэлектростанции, вызвал большой интерес.

Сообщение «Об опыте проектирования механического оборудования Цимлянского гидроузла» сделал член Общества инженер Московской проектной конторы Гидростальмаш Я. Н. Ветухновский, отметивший, что в создании этой немалую роль сыграло первичное отделение инженерно-технического общества, способствовавшее решению многих вопросов и оказавшее помощь конструкторам.

Члены коллектива энергетиков первичного отделения Общества при автозаводе имени Сталина М. М. Троицкий и А. С. Тихомиров демонстрировали на пленуме запрошенный и изготовленный ими опорный оригинальный ротор электрических импульсов, который позволяет в широких пределах менять частоту механических вибраций. Эту установку коллектив выполнил в порядке социального обязательства в помощь великим стройкам. Указанное устройство найдет широкое применение в промышленности на гидростроительствах при заливке свай и шпунтов и т. д.

За разработку и внедрение новой техники и технологий ряд членов МОНИТОЭ были вручены почетные грамоты.

Ученый секретарь МОНИТОЭ  
Кандидат техн. наук И. И. ИВАНОВ



## Награждение строителей Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина

Указом Президиума Верховного Совета СССР 19 сентября 1952 г. за особо выдающиеся заслуги и самоотверженную работу по строительству и вводу в эксплуатацию Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина, Цимлянской гидроэлектростанции и сооружений для орошения первой очереди в 100 тыс. га засушливых земель в Ростовской области звание Героя Социалистического труда присвоено двенадцати работникам великой стройки коммунизма.

Среди удостоенных этого высокого звания: выдающиеся инженеры-строители, внесшие большой вклад в решение ряда важных научно-технических проблем в области гидротехники и организации строительства, А. П. Александров, В. А. Барabanов, С. Я. Жук, Г. А. Руссо, Н. А. Филимонов, А. А. Щербинин; знатные новаторы строительства, упорно овладевавшие новой техникой и научившиеся использовать ее до дна, — начальник сверхмощного шагающего экскаватора А. П. Усков, электросварщик А. А. Улесов, экскаваторщик И. В. Ермоленко, Е. П. Симак, Д. А. Слепуха, бульдозерист В. И. Елисеев.



За успешное выполнение в срок заданий правительства за образцовое освоение и использование на строительстве новейшей отечественной техники орденами и медалями награждены многие строители — передовики социалистического соревнования на Волго-Доне. В их числе талантливые строители и монтажники Цимлянской гидроэлектростанции, инженеры и рабочие электропромышленности, самоотверженно трудившиеся для обеспечения великой стройки самыми совершенными и надежными машинами и аппаратами.

Многие строители Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина в настоящее время уже работают на строительстве новых крупнейших гидроэнергетических сооружений пятой пятилетки, применяя накопленный на Волго-Доне опыт и мастерство.

Награждение строителей Волго-Дона вдохновляет трудящихся людей на новые трудовые подвиги на благо нашей Родины, во имя торжества коммунизма.

## Совещание южных отделений ВНИТОЭ

В июне текущего года в Баку было проведено кустовое совещание южных отделений ВНИТОЭ: Азербайджанского, Армянского, Грузинского и Ростовского. На совещании были обсуждены итоги работы отделений и предложения на 1953 г.

Организации ВНИТОЭ принимали участие в мероприятиях по внедрению в производство новой передовой техники и по оказанию помощи великим стройкам коммунизма. Научные работники Энергетического института АН Азербайджанской ССР разработали вопрос об увеличении пропускной способности линии электропередачи Баку—Мингечаур на период строительства при работе линии с напряжением 110 кВ. Большую работу проделали члены ГрузНИТОЭ по оказанию помощи строителям Туркменского канала.

Совещание отметило ряд существенных недостатков в работе отделений: недостаточное вовлечение членов общества в социалистическое соревнование, недостаточный контроль со стороны руководства отделений за работой первичных организаций, особенно находящихся на периферии, затяжка с созданием первичных организаций в Мингечаургазстрое и др.

Азербайджанское отделение ВНИТОЭ провело участие в совещании экскурсию в город Мингечаур и строительство Мингечаурского гидроузла.

Инж. И. М. ПЕТРОВ

Баку

## Электроснабжение промышленных предприятий

Примерно 5/7 всей электроэнергии, вырабатываемой в СССР, потребляют промышленные предприятия. Одно это уже определяет особую важность задачи оптимального электроиспользования и электроснабжения промышленных предприятий. Решения задачи надежного и экономичного электроснабжения различных категорий потребителей электроэнергии, равно задачи рационального ее использования, — дело государственного значения.

В журналах «Электричество», «Промышленная энергетика», «Электрические станции» и др. названные вопросы систематически освещались на протяжении многих лет; однако потребность в фундаментальном труде, обобщающем ряд основных положений, сведений и рекомендаций в данной области, назрела давно. Такая книга до крайности необходима многочисленным инженерам и техникам-электрикам, работающим по проектированию, монтажу и эксплуатации электрохозяйства на предприятиях.

Разновременно Машгиз, Металлургиздат, Гизлегпром, Госэнергоиздат и др. выпускали книги по рассматриваемой теме, но их содержание было большей частью узко отраслевым и не восполняло пробела в литературе в целом. В 1951 г. Госэнергоиздат издал книги А. А. Федорова и Б. А. Князевского «Электроснабжение промышленных предприятий» и Ю. Л. Мукосеева «Вопросы электроснабжения промышленных предприятий». В этих книгах была сделана попытка более широко охватить тему, создать как бы пособие в этой области. Однако удалось это не вполне. Публикуя ниже некоторые замечания читателей, редакция журнала «Электричество» приглашает высказаться по затронутым вопросам, касающимся упомянутых книг, электриков и энергетиков, работающих в проектирующих и монтажных организациях, в энергоцехах предприятий и пр., с целью более полного выявления достоинств и недостатков этих книг и учета мнений читателей при подготовке новых изданий.

### Инж. Э. М. КАЖДАН

Ростовское ПКУ треста Кавэлектромонтаж

Содержание книги А. А. Федорова и Б. А. Князевского, по моему мнению, не соответствует ее названию. В ней задача электроснабжения предприятия значится наиболее целесообразную систему электрических устройств, обеспечивающую потребителей предприятия необходимой электроэнергией. В зависимости от конкретных условий электроснабжение предприятия может быть решено самым различным образом.

Для того чтобы составить систему электроснабжения, надлежит правильно оценить достоинства и недостатки отдельных элементов системы, так и всей системы в целом. В книге по электроснабжению промышленных предприятий должны содержаться материалы, знакомящие читателя с основами анализа систем электроснабжения, с подбором конкретных примеров, показывающих, как для наиболее характерных случаев решается вопрос электроснабжения предприятия.

К сожалению, в упомянутой книге А. А. Федорова и Б. А. Князевского мы не находим ответа на вопросы, интересующие нас при решении электроснабжения предприятия. В ней приведено общее описание схем и отдельных элементов системы электроснабжения, объяснение устройства и выбора в соответствии с их параметрами различных приборов, аппаратов, схем и т. п. Но в каком же и как следует применять тот или иной элемент и, кроме того, как они влияют на технико-экономические показатели системы электроснабжения, — этого в книге нет. Прочитав названную книгу, студенты энергетических и электротехнических учебных заведений и факультетов (которые написана книга), по существу за небольшое исключением, повторяют лишь то, что им должно быть известно из других курсов (сетей, подстанций, электроустановки и т. д.). Не больше пользы она принесет и инженерно-техническим работникам, занимающимся электроснабжением.

Из книги по электроснабжению читатели должны получить не формулы по расчету токов короткого замыкания, а как величина токов короткого замыкания влияет на работу электроснабжения; не описание аппаратов, приемы и т. д., а как и где их применить; не общее опи-

сание расчета сетей (по нагреву, потере напряжения и экономической плотности тока), а как в каждом случае следует рассчитывать (по нагреву или экономической плотности тока) и т. д.

Общее описание схем должно дополняться конкретными примерами с анализом полученных результатов и подробным описанием расчетов, производимых при составлении технико-экономических показателей вариантов электроснабжения.

Студентам и широкому кругу инженерно-технических работников необходима книга, обобщающая колоссальный опыт проектирования электроснабжения промышленных предприятий, имеющийся у нас в Советском Союзе (по всем отраслям промышленности).

Для издания такой книги по электроснабжению промышленных предприятий должны быть привлечены опытные специалисты ведущих проектных организаций системы Главэлектромонтажа МСПТИ и других организаций, работающих в этой области, а также энергетическая общественность.

### Инж. З. Н. ЩЕГОЛЬКОВ

Туймазанефть

Книга А. А. Федорова и Б. А. Князевского является ценным систематизированным сводом материалов для инженерно-технического персонала, специализирующегося в области электроснабжения промышленных предприятий. В книге просто и полно освещены основные вопросы электроснабжения, в приложении даны таблицы, необходимые для инженерных расчетов по электроснабжению.

При недостатках и упущениях необходимо учесть авторам при последующем издании данной книги.

1. С точки зрения последовательности изложения материала по курсу электроснабжения, глава IV книги «Подстанции промышленных предприятий» должна излагаться после главы II «Распределение электрической энергии на низком напряжении».

2. В книге дан расчет токов короткого замыкания только в установках напряжением до 1000 в. Мне ка-

жется, необходимо дополнить главу II расчетом токов короткого замыкания в установках напряжением свыше 1000 в.

3. В главе VII «Автоматизация электроснабжения промышленных предприятий» не освещен вопрос защиты и автоматизации главных понизительных подстанций предприятий.

4. В главе IV книги рассматривается релейная защита только на оперативном переменном токе. Эту главу необходимо дополнить вопросом освещения защиты на постоянном оперативном токе.

5. В книге совершенно пропущен вопрос о релейной защите генераторов на предприятиях.

6. Необходимо в книге полнее показать разнообразие и особенности подстанций промышленных предприятий. Этот вопрос в книге освещен недостаточно.

Книга своевременна и окажет большую практическую помощь инженерно-техническим работникам, работающим в области электроснабжения.

### **Доктор техн. наук, проф. С. П. РОЗАНОВ** **Московский институт химического машиностроения**

Книга А. А. Федорова и Б. А. Князевского посвящена рассмотрению одного из самых важных вопросов промышленной электротехники — правильному и надежному электроснабжению потребителей. Если задачу наивысшей выработки электроэнергии наивысшего качества на электрических станциях Советского Союза можно считать почти решенной общими усилиями крупных научно-исследовательских организаций, проектно-монтажных организаций, а также трудами отдельных ученых, инженеров и техников, то решение в общем виде задачи правильного, надежного и экономичного электроснабжения различных потребителей пока еще не найдено.

Как правило, электротехники решают вопросы электроснабжения на основании данных технологов, производственников, которые, однако, не имеют достаточной электротехнической эрудиции для подготовки данных, необходимых при выборе вариантов электроснабжения. Мощности электродвигателей обычно указаны завышенными с расчетом на наибольшую загрузку машин, коэффициенты одновременности работы отдельных машин и других потребителей, коэффициенты их загрузки оставляют желать много лучшего в смысле их соответствия действительности и т. д. Тем самым высококачественную электроэнергию, выработанную и переданную с наилучшим к. п. д., потребитель весьма часто использует неправильно, с большими потерями, в значительно большем количестве, чем это нужно для производства. Тем самым в процессе электроиспользования обесцениваются труды по рациональному производству и передаче электроэнергии.

Отсюда, на наш взгляд, следует, что не может быть курса электроснабжения промышленных предприятий «вообще». Этот курс должен быть обязательно конкретизирован по определенной отрасли производства или по группе однородных производств. Без этого он неминуемо превратится в сборник общих электротехнических указаний и неопределенных рецептов.

Этот органический порок присущ и рассматриваемой книге, несмотря на все старание авторов написать обобщающую книгу о предмете, требующем особой конкретности и специализации именно по роду производства.

Лишь материал главы I можно признать полностью относящимся к вопросу электроснабжения промышленных предприятий. Авторы стараются достаточно детально объяснить способ определения электрических нагрузок на основе существующих воззрений и приемов. Однако их стремление избежать конкретных рекомендаций и дать общие положения приводит или к неясности, или к рекомендации самоочевидных истин. Кроме того, по нашему мнению, изложение некоторых рекомендаций ошибочно. На стр. 16, например, написано «конечной целью при определении  $P_p$  (расчетной мощности) является нахождение таких размеров элемента, например сечения провода, при которых нагрев выбираемого элемента не превысил бы нагрева согласно правил». Конечно, авторы правы в том, что провод не должен перегреваться током. Но разве только это является конечной целью выбора провода? Несомнен-

но, что конечной целью является бесперебойное питание потребителя электроэнергией высокого качества при минимальных расходах на это.

На стр. 17 написано «из выражения (1-1) выделить величину расчетной мощности, выраженную  $P_p$  (установленную мощность) и  $K_c$  (коэффициент спроса). Авторы были бы правы относительно легкости деления  $P_p$ , если бы было нужно сделать столько арифметических действий над известными величинами. Однако дело обстоит совсем иначе. Как раз трудно определить достоверную величину коэффициента спроса. Это, в противоречие самим себе, впрочем, делают и сами авторы на стр. 20, указывая, что «определение коэффициентов  $C$  и  $B$  (коэффициентов, характеризующих степень использования электродвигателей и влияющих на величину коэффициента спроса —  $C_p$ ) для различных отраслей промышленности — задача весьма нелегкая, требующая трудоемкой работы». Следовало бы сказать, — а главное хорошего знания производства того, чтобы с достаточной достоверностью определить величину  $K_c$ , надо хорошо знать данное производство только в настоящем состоянии, но и пути развития. Сами авторы отмечают (стр. 18), что, например, ритмичность движения влияет на изменение коэффициента спроса.

Совсем непонятно утверждение авторов, что «величину коэффициента спроса для любого предприятия нельзя найти как отношение расчетной мощности к установленной мощности». Как же так? Ведь одновременно авторы рекомендуют определять расчетную мощность через коэффициент спроса. А разве директивы партии и правительства, борьба новаторов производства (Ковалева, Хвостова) за новые методы производства (суточные и годовые графики) не влияют на характер потребления электроэнергии?

На стр. 33 авторы особо подчеркивают, что «особенности электростанций (надо полагать, советских промышленных предприятий) имеют, как правило, малую мощность». Во-первых, это просто неверно. Авторы могут не знать о весьма больших мощностях собственных электростанций предприятий, например металлургической или химической промышленности. Во-вторых, электростанции промышленных предприятий всегда работают параллельно с районной сетью. Некоторое количество увеличивших автономных заводских электростанций можно считать примером устаревшей, уходящей в прошлое тенденции ориентации учащихся на эти станции нецелесообразно.

На стр. 37 авторы указывают: «рассматривая варианты нагрузок, выбираемые варианты размещения Г.Э.С., подстанций и схемы электроснабжения предприятия, легко оценить целесообразность выбора любого из намеченных вариантов и принять на основании технико-экономических показателей окончательное решение по этим вопросам». Что этот выбор сделать совсем не так просто, наоборот, трудно, доказывают неоднократные неудачные решения электроснабжения предприятий. Авторы поэтому не только не смогли привести примера легкого выбора, но и не указали даже, как оценить целесообразность выбора варианта, соответствие его поставленной цели. Какую цель следует иметь в виду? Минимум капитальных вложений? Минимум потерь энергии? Минимум ежегодных расходов? А как предлагают авторы оценивать надежность устройства, необходимость учета потерь в производстве? Сколько вариантов надо рассмотреть, чтобы правильно решить вопрос электроснабжения? Как можно гарантировать, что в число рассмотренных вариантов вошел также и наилучший из всех? Указание на легкость выбора варианта есть дезориентация учащихся, воспитание неправильного, легковесного понимания действительности трудного вопроса, отвод в сторону борьбы с трудностями.

Основная часть материала главы II уделена расчету сечения проводов по нагреву и по потере напряжения, расчету систем защиты и аппаратов. Этот материал имеет прямое отношение к курсу электрических сетей. В изложении более полно и лучше он изложен в книге проф. А. Я. Рябова. К тому же он не имеет прямого отношения к электроснабжению, так как не определяет выбор схемы питания электроустановок. В формуле ошибочно под корнем во второй скобке между членами поставлен знак плюса вместо минуса.

В данной главе рассмотрены различные схемы питания электроустановок, но рекомендации даны лишь в общем виде и лишены конкретности настолько, что на практике нет возможности принять удовлетворительное решение для электроснабжения. Рекомендации по группировке электродвигателей даны с точки зрения электрика, полагающего возможным подчинить нужды производства электрическим целям. Так, например, на стр. 43 сказано, что от способ группировки потребителей рационален с точки зрения использования сети низкого напряжения».

Достоинством радиальной системы питания потребителей авторы считают отсутствие влияния повреждения одного токоприемника или питающей линии на питание того. Это верно, если стоять на точке зрения чистого электрика, не учитывающего особенностей производства. действительности при современных поточных способах производства останов одного из электродвигателей и, следовательно, связанной с ним машины неминуемо должен вызвать останов и всех остальных машин и электродвигателей потока. Случаи, указанные авторами, единичны и характерны для советского поточного производства.

В главе III рассмотрены различные схемы распределения электроэнергии на высоком напряжении. Ответив для этого объем материала, однако, очень мал, и не понятно, что авторы уделили различным схемам только общее внимание. Аналогичный материал во второй раз полнее дан в книге М. И. Славнина «Электрические нагрузки и первичное распределение электрической энергии в промышленных предприятиях» изд. 1949 г. Таблицы приложений 11-1, 11-2 представляют простую перепечатку таблиц № 1 и № 3 из книги Славнина. Причина данного только в одном случае изменения средневзвешенного коэффициента спроса для химических заводов М. И. Славнина 0,28, в рассматриваемой книге 0,26) не ясна.

Очевидно, именно недостаток места не позволил авторам более подробно решить вопросы выбора оборудования питания различных потребителей. Авторы, например, на стр. 118 указывают, что «потребители 2 категории могут иметь один-два источника питания. В этом случае вопрос о числе источников питания решается кончно в зависимости от значения, которое имеет данное промышленное предприятие в народном хозяйстве страны». Если авторы имели в виду определенное производство, они могли бы избежать таких общих и расплывчатых формулировок, по сути дела рекомендующих учащемуся решить вопрос электроснабжения по собственному разуму.

Авторы далее указывают, что «схемы распределения электрической энергии на высоком напряжении по промышленному предприятию в системе внутреннего электроснабжения различаются в зависимости от конкретных условий, как то: необходимой степени надежности питания предприятия или отдельных его цехов, графика производства, перспективы дальнейшего развития и расширения производства, сезонности работы и т. д.» И именно конкретности данных не хватает в этом общем правильном совете. Учащийся не получает никаких сведений, позволяющих ему решить, когда и какую форму применить, как выбрать схему по графику, как по перспективу электроснабжения при различных планированиях производства.

Приведенный на стр. 143—145 пример выбора напряжения выполнен очень схематично и закончен крайне неуместно возможностью выгоды или того, или другого варианта «на основании (сравнения) стоимостей эксплуатационных расходов». Используя каталоги, справочники, ценники, можно было бы дать живой, вполне конкретный пример. Попытки дать рекомендации в общем виде приводят ни к чему, кроме как к повторению общезвестных или самоочевидных положений, вроде того, что расчет по одному варианту могут быть или больше, или меньше, или меньше, чем по другому варианту (стр. 145). Авторы все же признают, что выбор схемы, выбора напряжения, вообще всех элементов электроснабжения могут и могут быть сделаны «с учетом специфической природы данного производственного предприятия». Следовательно, только ориентируясь на определенное производство или на группу однородных производств, можно вполне конкретные логичные указания и отстаивать убеждение в преимуществах того или другого варианта.

В главе IV, рассматривающей подстанции промышленных предприятий, непосредственное отношение к электроснабжению имеют только пп. 1, 2, 3. Остальной материал лучше и полнее изучают в курсе «Электрическая часть станций и подстанций» и даже в курсе «Электрические измерения». Помещение этого материала в данной книге загружает ее объем; бесполезно растрачивается время учащегося на повторение. Все чертежи защит, компоновок и разрезов можно найти в книгах А. А. Глазунова, Л. Н. Баптиданова и В. И. Тарасова и др.

Глава VI, в которой изложены расчеты и устройство заземляющих и зануляющих установок, лишняя, так как этот раздел изучают в курсе техники безопасности. В книге А. И. Кузнецова «Техника безопасности в электрических установках», издание 1950 г., расчет заземляющих и зануляющих устройств сделан и полнее, и лучше. Авторы сами, очевидно, пользовались этой книгой, так как в некоторых случаях текст их книги (например, строки 1...7 снизу на стр. 278) дословно совпадает с текстом книги А. И. Кузнецова (строки 4...10 сверху на стр. 66).

Наконец, рассматривая содержание приложений к книге, следует отметить, что к вопросу электроснабжения непосредственно относятся лишь приложения 1—5. Остальные приложения, сами по себе достаточно ценные, по сообщаемым сведениям, к электроснабжению касательства не имеют. Приложения 6, 9, 15, 16, 17, 19, 27 имеют отношение к расчету электрических сетей. Приложения 7, 8, 10...14, 20...26 относятся к курсу «Электрическая часть станций и подстанций». Приложения 28, 29 относятся к курсу электропривода.

Задачей курса электроснабжения является не повторение пройденного в меньшем объеме и в худшем изложении, а синтез знаний, полученных при изучении этих курсов на базе конкретной отрасли производства. Необходимо установить их связь и взаимопроникновение, взаимовлияние и взаимодействие, показать, как выбор элементов производства влияет на выбор элементов электрооборудования и как элементы электрооборудования влияют на характер производства; разъяснить, что электрооборудование является следствием развития производства и служит одновременно важнейшей причиной этого развития. Вот, что особенно необходимо. Если же выдернуть эту основу, то отдельные элементы, лишенные общей связи, рассыпаются и курс получается эклектичным собранием из различных курсов. Это и произошло с рассматриваемым учебником.

Положив в основу богатый опыт практики и архивные материалы проектно-монтажных организаций, научно-исследовательских учреждений, отдельных заводов и фабрик, их огромные достижения, можно было создать очень ценную книгу. В этой книге можно было показать органическую связь производства и электротехники, примеры правильного и неправильного решения задачи электроснабжения, показать, какими путями правильное решение вопросов электроснабжения поднимает производство на новую, высшую ступень, уделить внимание выбору правильной системы электроснабжения в свете перспективного планового развертывания промышленности. Нельзя в настоящее время проектировать и осуществлять электроснабжение без учета производственных процессов, без учета автоматизации и механизации, без учета стирания граней между трудом умственным и трудом физическим, без учета нарастающих темпов приближения к коммунизму.

Авторы поставили перед собой неосуществимую цель — дать учебник по электрооборудованию промышленных предприятий, ничего не говоря о производстве. Поэтому и получилась книга, которая лишь в очень малой степени соответствует поставленной задаче, книга, которая ничему конкретному не учит, хотя имеет гриф учебника, а в аннотации названа учебным пособием.

Следует также отметить аполитичность книги, так как вопросы электроснабжения не рассмотрены с точки зрения политики социалистического государства: в книге нет примеров того, как резко различаются принципы, на основании которых выполняется электроснабжение капиталистических и социалистических предприятий.

В книге нигде, за исключением нескольких строк введения, не отмечена ведущая роль русских и советских (особенно последних) ученых, инженеров и техников в разработке и в выполнении различных систем электроснабжения. Упоминание нескольких второстепенных имен, конечно, не исчерпывает списка выдающихся отечествен-



ных инженеров, специалистов по электроснабжению промышленных предприятий, в том числе лауреатов Сталинских премий.

В заключение вновь подчеркиваем, что курс электроснабжения нужно писать применительно к каждой отрасли промышленности и вместе с тем не загромождать его подробностями, изучение которых служит предметом других электротехнических курсов.

## Доктор техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

Москва

В то время как книга А. А. Федорова и Б. А. Князевского является учебником, книга Ю. Л. Мукосеева представляет собой практическое пособие справочного характера, созданное на основе личного опыта работы автора. Оно предназначено, в первую очередь, для практиков-проектировщиков электроснабжения промышленных предприятий. Основными достоинствами книги Ю. Л. Мукосеева являются: большое количество конкретного, фактического материала, искусно помещенного в сравнительно малом объеме; вполне современный уровень содержания; объективная оценка тех решений, по которым в технических кругах нет еще единой точки зрения. Достаточно подробно в книге освещены вопросы определения нагрузок и расчета сетей в случаях многих потребителей энергии со специальными характеристиками—крановых (стр. 48—49) и сварочных (стр. 54—57). В книге А. А. Федорова и Б. А. Князевского мы не встречаем соответствующих данных; эти авторы не сочли нужным осветить пионерские работы ряда советских инженеров (Н. В. Копытов, В. А. Розенберг, М. А. Лакс и др.), разработавших аналитические методы подсчета указанных нагрузок с использованием принципов теории вероятности.

Вопрос о коэффициенте мощности и способах его повышения занимает в книге Ю. Л. Мукосеева всего лишь 6 стр. против 46 стр., отведенных этому вопросу А. А. Федоровым и Б. А. Князевским. Однако в первой из названных книг читатель может получить более правильные рекомендации по улучшению коэффициента мощности (стоит, например, сравнить трактовку в обеих книгах метода секционирования статорных обмоток у асинхронных двигателей). Вообще, нужно отметить, что глава «Повышение коэффициента мощности» в книге А. А. Федорова и Б. А. Князевского не дает четкого представления об истинной и практической ценности способов повышения коэффициента мощности. Непропорционально большое внимание, почему-то уделяемое здесь авторами синхронной машине с механическим выпрямителем, также не способствует правильной ориентировке в указанном вопросе. Аналитическая трактовка вопроса об оптимальных пределах повышения коэффициента мощности (стр. 250—256) представляется излишне усложненной.

Не свободна от недостатков и книга Ю. Л. Мукосеева. Говоря о выборе частоты тока (стр. 9), автор неправильно указывает на привод рольгангов в металлургической промышленности как на потребителя повышенной частоты. В действительности этот вид привода требует либо нормальной частоты 50 гц, либо пониженной частоты (от 50 до 10 гц). Кроме того, здесь следовало бы указать на новейшую тенденцию в электрооборудовании подъемных кранов на переменном токе, заключающуюся в питании двигателей регулируемой пониженной частотой, получаемой от специального преобразователя частоты.

Очень поверхностно освещен вопрос самозапуска асинхронных двигателей при восстановлении напряжения в сети, имеющий большое значение, например, для сетей электроснабжения на нефтепромыслах. Тот же упрек следует сделать и относительно главы о токах короткого замыкания.

Автор хотя и старался придать своей книге характер универсального справочного пособия, но, видимо, связан-

ный рамками своей практической деятельности, отраслей промышленности не коснулся. Это замечается, главным образом, к главе 2-й, характер потребителей электрической энергии по отдельным отраслям промышленности. Так, сюда не вошли такие отрасли: горная и нефтяная, полиграфическая, пищевая, деревообделочная, стройматериалов (включая производство стекла и фарфора).

Есть ряд пробелов, присущих обеим книгам, в них полностью обойден вопрос о величине и способе подсчета потерь энергии в питающих проводах, не комбинированную нагрузку, т. е. сумму нагрузок более приемников с неодинаковыми графиками, вопрос часто возникает в практике.

Обе книги не касаются вопроса о наименьшей конструктивно выполнимой мощности асинхронного двигателя для данного напряжения и об экономической грани приемников низкого и высокого напряжения. Всем этого выпадает важная часть методики компоновки и читатель не получает указаний о том, как следует выбирать двигатель,—непосредственно на высокое напряжение или на низкое, присоединяя его через соответствующий понижающий трансформатор.

Авторы обеих книг почему-то не отмечают тех случаев, в практике крупных заводов к переходу на напряжение электроснабжения  $11 \text{ кВ} \approx \sqrt{3} \cdot 6,3 \text{ кВ}$ , вызванном суммой мощностей отдельных приемников (прокатные станы и протяженности заводских сетей).

В обеих книгах вопросы повышения коэффициента мощности рассматриваются, исходя из постоянной нагрузки. Не выясняется вопрос об оптимальной мощности пускового устройства в случае резкопеременной нагрузки. Не разъяснена связь между скоростью асинхронного двигателя и величиной номинального напряжения, позволяющего сохранить почти номинальное значение коэффициента мощности двигателя. Вообще, здесь уместно было бы привести своеобразные характеристики тока статора асинхронного двигателя при постоянной нагрузке на его валу и при изменении напряжения на зажимах статора в широких пределах (своего рода V-кривые для асинхронного двигателя).

Ничего не сказано в книгах о цепях управления так называемых контрольных проводах для дистанционного управления агрегатами. Эти провода имеют в комбинированных предприятиях значительное протяжение. Большое значение имеет вопрос выбора напряжения для цепи управления, особенно в связи с «емкостным эффектом» в проводах.

Хотя обе книги уделяют значительное внимание графикам нагрузки промышленных подстанций, ни в одной из них не описывается «график повторяемости» длительности нагрузок во времени (с расположением ординат в убывающем порядке). Между тем такой график имеет существенное значение при выборе мощности трансформаторов и для других случаев.

Недостаточно освещен вопрос о несимметрии в создаваемой некоторыми видами потребителей, например сварочной нагрузкой; совершенно не описаны средства для уменьшения такой несимметрии.

Область электроснабжения промышленных предприятий, рассматриваемая комплексно, охватывает весьма большое число технических и технико-экономических вопросов. Бурный рост советской промышленности обогащает электриков обширным опытом по части проектирования и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий. Но методы проектирования и практические навыки в этой области были сосредоточены только в проектных организациях и обмен опытом осуществлялся почти исключительно посредством журналов статей по разрозненным вопросам. Издание справочных учебных пособий по данной теме должно, по-видимому, осуществляться с привлечением целого коллектива авторов, знания и практический опыт которых в разных отраслях могли бы быть обобщены с целью создания капитального труда по вопросам электроснабжения промышленных предприятий.