

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>К новому мощному подъему электрификации Советского Союза</i>	3
<b>Н. П. Иванов и Г. Н. Петров — Гидрогенераторы</b>	11
<b>В. Ю. Гессен, В. В. Ивашев, В. Г. Кохемякин и Л. Д. Наумовский — Трансформатор для емкостного отбора мощности от высоковольтных линий электропередачи</b>	25
<b>М. М. Акодис — Регулирование скорости нарастания обратного напряжения в цепях с ионными вентилями</b>	31
<b>Р. И. Караев — Методика расчетов симметричных режимов работы дуговых печей</b>	38
<b>И. К. Федченко и М. Е. Иерусалимов — Новый метод профилактических испытаний аппаратных изоляторов</b>	45
<b>Н. М. Горбатов — Расчет токов короткого замыкания в трехфазных цепях с последовательной несимметрией</b>	49
<b>Г. С. Векслер — Метод получения основной кривой намагничивания</b>	53
<b>И. Н. Кротков — Классификация мостовых схем постоянного и переменного токов</b>	60
<b>В. Н. Мильштейн — Частотная компенсация вольтметров переменного тока</b>	67
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
<b>Б. Н. Ржонсницкий — Дмитрий Александрович Лачинов. К 50-летию со дня смерти</b>	75
<b>Л. Д. Белькинд — Первая всесоюзная светотехническая выставка 1927 г.</b>	79
<b>ДИСКУССИИ</b>	
<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. Волоцкой</b>	81
<b>ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ</b>	
<b>Успехи советской радиотехники. Опоры уличных светильников. Высоковольтные игнитронные выпрямители. Сердечники из холоднокатанной стали для силовых трансформаторов. Координация места установки разрядников с уровнем импульсной прочности трансформаторов. Люминесцентные лампы с холодными катодами</b>	83
<b>ХРОНИКА</b>	
<b>На строительствах 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</b>	91
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
<b>Электроснабжение промышленных предприятий. — От редакции</b>	93
<b>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. Мусосеева „Вопросы электроснабжения промышленных предприятий“</b>	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 является 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 созидаельной работы по укреплению могущества Советской страны и подъему благосостояния трудящихся. Словиях все большего сплочения советского народа вокруг славной коммунистической партии — гениального и любимого вождя товарища Ильина.

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

Зовы очередного партийного съезда советский народ встречает новыми трудовыми подвигами, демонстрирующими перед всем миром неуклонное стремление к созидаельной работе во великой цели — построения в нашей стране коммунистического общества.

Вместе с советским народом XIX съезд партии радостно встречают и все трудящиеся стран Европейской демократии: Польши, Чехословакии, Греции, Румынии, Болгарии и Албании, Монголии Народной Республики, Народной Республики Китая и Германской Демократической Республики, составляющие могучую армию, успешно борющуюся за мир во всем мире и с энтузиазмом идущую по революционному пути строительства социализма в своих странах. Огромный ряд достижения Советского Союза в политической, хозяйственной и культурной областях социалистического строительства ныне полностью изъянуты в государственном развитии стран Европейской демократии.

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

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 начертал 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 наращения 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 в примерно в 2 раза.

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

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

Вместе с количественным ростом производимым в новом пятилетии, первое внимание обращается на дальнейшее повышение качества изделий, в частности, путем решения вопроса о внедрении 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 новом временном значительном росте его продуктивности, увеличение валовой и товарной продукции земледелия и животноводства — должна быть решена путем дальнейшего укрепления и развития общественного хозяйства колхозов, улучшения работы совхозов и МТС на основе внедрения передовой техники и агрокультуры. В этом решении 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, должна 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: полезащитное соразведение, орошение, обводнение, осушение болот и т. п. Ставится задача завершить механизацию основных полевых работ и широко развернуть механизацию трудоемких работ в животноводстве и в других отраслях сельского хозяйства.

большое значение для дела электрификации народного хозяйства имеет указание, содержащееся в проекте директивы съезда о направлении капиталовложений колхозов в первую очередь на развитие общественного хозяйства. Строительство колхозных электростанций отнесено проектом директивы к работам, на которые капиталовложения колхозов должны быть направлены в первую очередь. Колхозные электростанции будут играть 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 изюминками 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 на еще на более высокий технический уровень.

Еще ряд задач, направленных на дальнейшее развитие применений электричества в быту, в коммунальном хозяйстве, в медицинской практике, в кинотехнике и пр., должен быть решен в новом 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 размеров цен не менее чем на 35%, значительное улучшение жилищного строительства, улучшение и развитие здравоохранения населения, переход к семилетнему образованию 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 выше областях.

\* \* \*

Выполнение пятого пятилетнего плана явится первым 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 захвата 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. квт 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 на конец пятилетия 82 млрд. квт в год. Фактическая же выработка электроэнергии в 1950 г. превысила 90 млрд. квт, 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, Кааховской гидроэлектростанции на Днепре с Южно-Украинским и Северо-Крымским каналами, а также решения об ускорении строительства Волго-Донского канала с Цимлянской 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 Кааховской 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 с строительством крупных электростанций будет 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 намечено построить Нарвскую гидроэлектростанцию, Рижскую теплоэлектроцентраль и развернуть строительство Каунасской гэс.

Теплофикация городов и промышленных предприятий получает новое мощное развитие, чего предусматривается строительство теплотрасс, теплоцентралей и теплосетей.

Энергетическое хозяйство страны в течение 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 заданий по выпуску важнейших видов оборудования 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

тют сделать в ближайшие годы коллекти- прославленных орденоносных электромаши- юрительных заводов: «Электросила», «Дина- Московского трансформаторного, «Урал- фраппарат», ХЭМЗ и многих других. ляющее техническое перевооружение народ- хозяйства и повышение уровня механизации юемых и тяжелых работ возможны только из-за передовой электротехники, быстро ис- 1957

1957

советские электромашиностроители вышли в же ряды современного гидро- и турбогене- юстроения, трансформаторостроения, высо- кого аппаратуростроения и т. д. В советских ю-исследовательских организациях и заво- разработаны многие сложные и оригиналь- технические проблемы, впервые возникаю- в мировой практике в связи с грандиозным ютическим строительством, проводящимся юетском Союзе. Решение этих проблем, ющих также и большое теоретическое значе- в области электротехники, прокладывает юпути в науке и утверждает приоритет со- юой научной мысли. Советские специалисты, юющие на великих стройках коммунизма, вы- юют ряд новых научных задач, вносят ценные юческие предложения, имеющие исключитель- юперспективы. В качестве примера можно на- юригинальное и перспективное предложе- юи комбинированном производстве электриче- юи тепловой энергии на гидроэлектростан- юи выдвинутое на строительстве Сталинград- юи гэс.

жело работающих на великих стройках юизма машин и агрегатов по своему кон- ютивному совершенству, по производительно- юи мощности представляют первоклассные юи, по которым в самое ближайшее время юи изготовлены десятки и сотни других. Твор- юи мысль советских инженеров и изобрета- юи продолжает рождать все более совершен- юи оригинальные конструкции и схемы. На- юи, на заводе «Динамо» им. Кирова разра- юи проект электрооборудования шлюза Кам- юи гидроэлектростанции, представляющий со- юи настоещее время последнее слово в обла- юи автоматического управления гидрооруже- юи. На заводе «Электросила» им. Кирова юи выполняется заказ на первый гидроген- юи для Горьковской гэс. Конструкторами юи разработан новый уникальный гидрогене- юи для Мингечаурской гэс, закончен разра- юи технический проект гидрогенераторов для юи 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, напри- мер, 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 напряже- ние 400 кв с разрывной мощностью в 10 млн. ква. Советским энергетикам предстоит разрешить серьезный комплекс вопросов, связанных с пере- дачей электроэнергии на большие расстояния пе- ременным и постоянным токами высокого напря- жения.

Заслуженная роль в разработке и создании новых технически совершенных машин и агрегатов принадлежит успешно развивающемуся со- дружеству ученых и производственников, которое в течение пятой пятилетки должно еще больше укрепиться и внести свой ценный вклад в осуще- ствление технического прогресса во всех отрас- лях народного хозяйства СССР. Как уже отмечалось выше, в проекте директив предусматривает- ся рост грузооборота. Исходя из того, что важ-нейшей задачей в области железнодорожного транспорта признано увеличение пропускной способности железных дорог, наряду с проекти- руемым увеличением ввода в действие вторых путей намечено огромное ускорение сдачи в экс- плуатацию новых электрифицированных желез- ных дорог.

За пятилетие протяженность новых электри- фицированных железных дорог в 4 раза превы- сит протяженность существующих в настоящее время электрифицированных дорог. Одновремен- но все железные дороги СССР будут все в боль- шей степени оснащаться самой совершенной электрической аппаратурой. Количество стрелок, оборудованных надежной электрической центра- лизацией, увеличится в 2,3 раза. Значительно увеличится применение новейшей диспетчерской централизации. Будут продолжены работы по внедрению радиосвязи для управления движе- нием поездов и маневровой работой. Начнется

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

Дальнейшее развитие в пятой пятилетке получат 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, выполненных на колхозных фермах, и в результате хозяйству высокий экономический эффект. Наишим показателем эффективности электрификации в колхозах и совхозах является экономия в рабочей и тягловой силе. Опыт работы в электрифицированных колхозах показывает, что на каждые 1 000 квтч электроэнергии, затраченной на электрификацию производственных машин, достигается экономия в 300 чел-дней и 10 недель. 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 большом 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, расширение целого ряда актуальных научно-технических проблем и дальнейшее внедрение во всех областях народного хозяйства современной техники, как правило, тесно связанны с новыми изменениями электричества и с разработкой новых передовых методов в уже освоенных ранее отраслях электротехники. Особое значение приобретает внедрение электроавтоматики для управления электрифицированными машинами и агрегатами. Электроавтоматика значительно повышает производительное использование машин, качественно изменив брак продукции. Высокоростные методы обработки изделий будут в пятой пятилетке развиваться особенно широко. Огромный 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 электротехнологические. Электророзакалка, электроизогрев, индукционный и высокочастотный нагрев, электр

ка, электросушка и т. д. — все эти высоковоздительные методы промышленной обращения будут в пятой пятилетке развиваться особенно быстро благодаря увеличению выработки дешевлению электроэнергии с вступлением в действие новых предприятий новых крупнейших гэс.

Фройд иллюстрацией новых масштабов энергетического строительства 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 директивы 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 стоит разрешить в области электротехнических материалов, кабельной и измерительной аппаратуры. Методы и средства лабораторных исследований должны подняться на более высокую линию своего развития.

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

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 замыкации 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 хозяйствственно-политических задач на нынешнем этапе коммунистического строительства, к которому относится новый пятилетний план. Большие усилия должны приложить научные и инженеры, умелое руководство должны проявить научные, хозяйствственные 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 директивы по пятому пятилетнему плану отведено вопросам подготовки 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 втузов 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 директивы 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 интелигенции, 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 Маркса. Расцвет науки и культуры в нашей стране один из внушительных показателей превосходства социалистического строя над капиталистическим строем.

Мирное развитие советской экономики, нацеленное пятым пятилетним планом, небывалый подъем, осуществляемый в деле электрификации народного хозяйства СССР, противостоят экономике капиталистических стран, идущих по пути милитаризации народного хозяйства, получающих 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 трудящимся всего мира товарищем Сталиным.



*Считать особо важной задачей в машиностроении полное обеспечение оборудованием электрических станций. . .“*

*(Из проекта ЦК ВКП(б) директивы ХIX съезда партии по пятилетнему плану развития СССР на 1951—1955 годы).*

## Гидрогенераторы

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

**Введение.** Гидрогенератор представляет собой асинхронную машину,ирующую в режиме генератора и преобразующую механическую энергию гидротурбины в электрический ток.

Гидроэлектростанции, на которых работают генераторы, являются одним из важнейших звеньев в комплексе гидросооружений великих рек коммунизма.

Гидрогенаторостроение в СССР развивается стремительными темпами. В настоящее время наиболее крупные<sup>1</sup> в мире гидрогенераторы изготовлены Советском Союзе и успешно эксплуатируются на Щербаковской и Днепровской гидроэлектростанциях.

Название электрических станций	$P$ , ква	$n$ , об/мин	$\frac{P}{n}$ , ква/об/мин	Давление на подшипник, 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 генераторов и еще полностью не решенными.

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

Рассматриваются особенности современных гидрогенераторов большой мощности, применяемых на крупных гидростанциях. Дается описание основных конструктивных узлов машин различного исполнения. Статья имеет обзорный характер и предназначается 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 угловой скорости вращения и большие маховые моменты.

Существуют гидротурбинные установки с горизонтальным валом; тогда генератор мало отличается от нормальной синхронной машины, хотя кратность угловой 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 длином. 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.

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

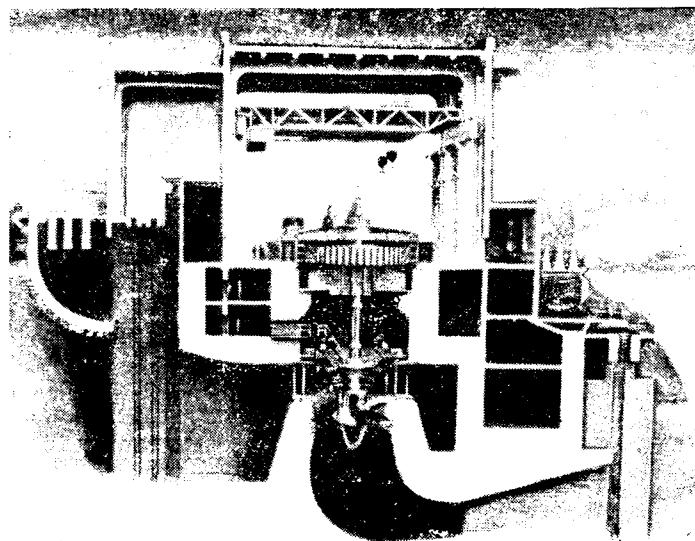


Рис. 1. Гидроэлектростанция в разрезе.

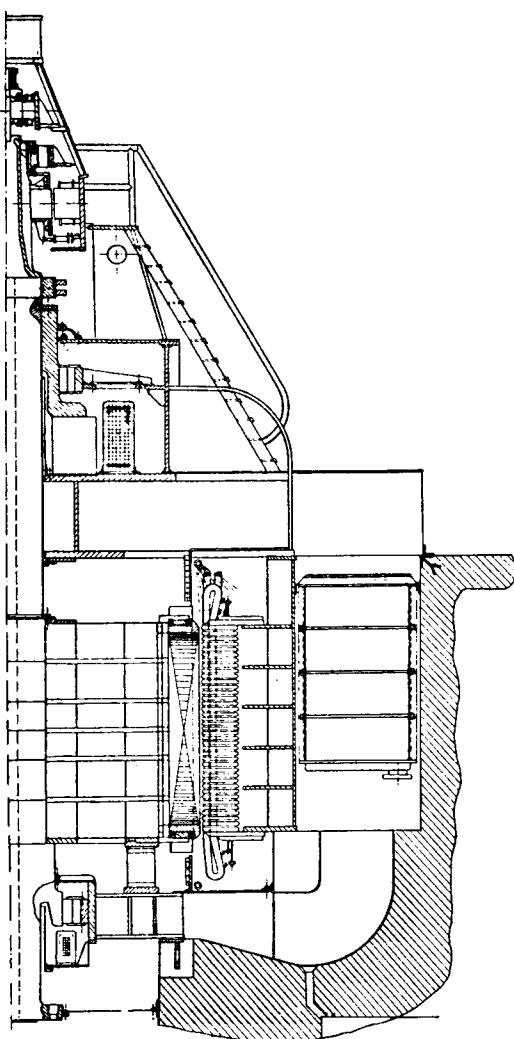


Рис. 3. Конструкция быстроходного гидрогенератора.

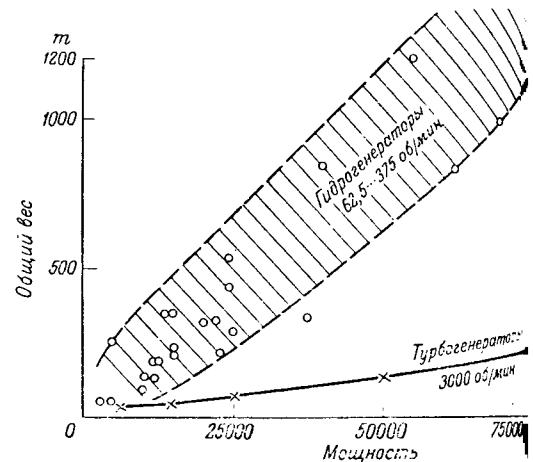


Рис. 2. Сравнительные данные общих весов генераторов и турбогенераторов.

**Зависимость параметров и конструкции гидрогенератора от характера гидроэнергетического сооружения.** Характер гидроэнергетического оружия зависит от профиля русла реки. Горные реки с их крутым профилем русла и большей скоростью течения воды хорошо приспособлены для сооружения гидроэнергетических установок. Возможность получения высоких напоров возможна при относительно малых расходах воды позволяет применять на горных гидроэлектростанциях быстроходные 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 и большие ее расходы. Гидроэлектростанции таких реках характеризуются малыми напорами и относительно большими расходами воды, что приводит к применению тихоходных машин 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

менее 150 об/мин. Сравнение гидрогенераторов подвесного и зонтичного типов будет дано ниже.

выше 187 об/мин могут быть отнесены 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 машинам в зависимости от их мощности.

Увеличение мощности гидрогенератора в достижении предельных окружных скоростей может быть получено лишь за счет увеличения осевой длины машины, может привести к соотношению основных размеров машины  $\frac{D}{l}$ , характерных для быстроходных машин. Например, гидрогенератор мощностью 18 000 ква, имеющий при 100 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 выделяются 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 инженер 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 щели 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 таинственных агрегатов на станции агрегатов.

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

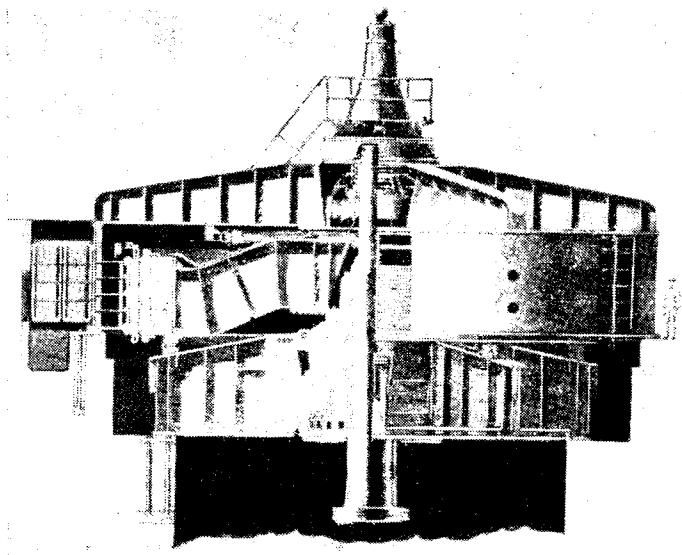


Рис. 4. Конструкция тихоходного гидрогенератора.

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, ква	Мощность одного агрегата, ква	Скорость вращения, об/мин	Удельный вес гидрогенераторов, кг/ква
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 загруженности активных материалов.  $D^2 l$  в этом равенстве может характеризовать размеры машины и ее вес.

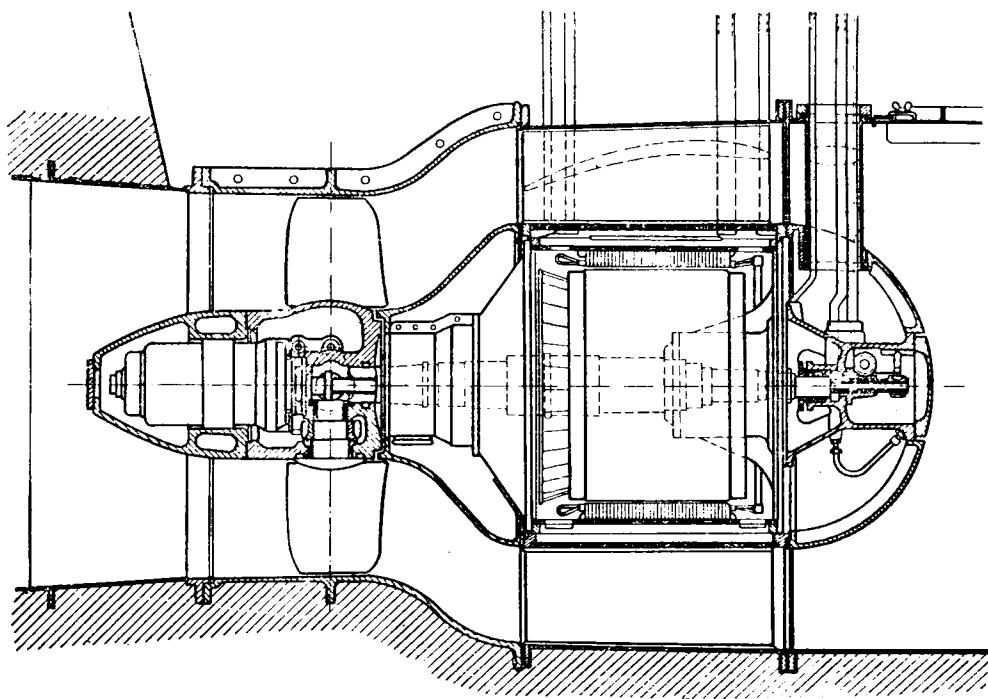


Рис. 5. Горизонтальный агрегат с асинхронным генератором.

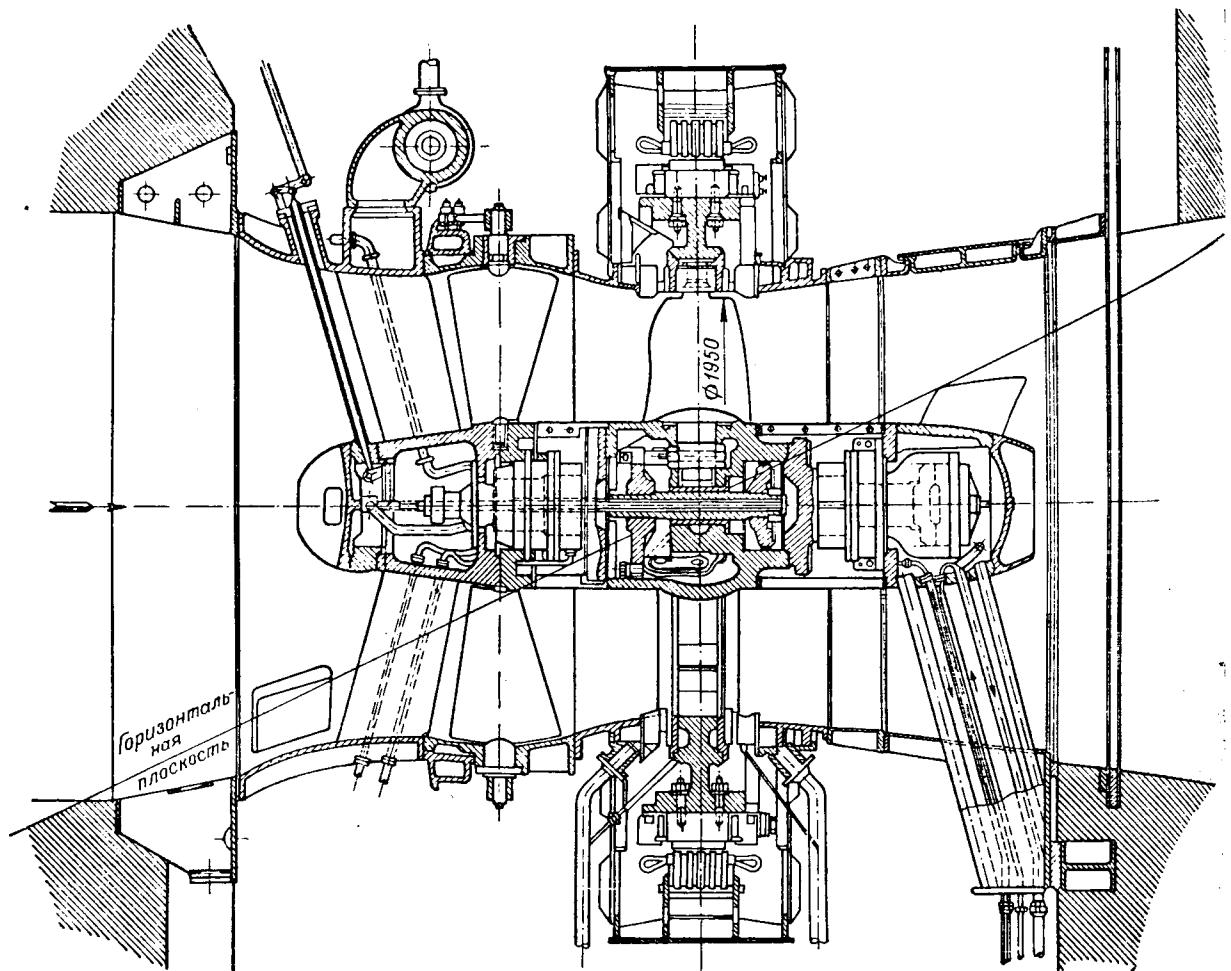


Рис. 6. Горизонтальный проточный агрегат.



Рис. 7. Рост мощности гидрогенераторов в одной единице.

ость вращения вызывает трудности в создании механически прочной конструкции ротора, и эту скорость вращения является одним из факторов, влияющих на определение целесообразной предельной мощности гидроагрегата. Кроме того, предельная мощность гидрогенератора ограничивается предельным значением нагрузки на подпятник, которая может быть определена лишь для заданных конкретных условий и достигнутого уровня техники гидроагрегатостроения. Вследствие большой стоимости генератора и трудности его испытания изголовление опытного образца исключается и поэтому при проектировании гидрогенераторов, в частности их подпятников, приходится базироваться на опыте построенных машин и на четкости, 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 разъемными. Однако некоторые детали по условиям прочности не могут быть выполнены разъемными. Так, например, центральная часть грузонесущих крестовин и вал с фланцами и насаженными на него втулками. Возможности обработки и связки 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 дан рост электромагнитного момента вращения гидрогенераторов, построенных в

( $\frac{\text{квт}}{\text{об/мин}}$ )

г.

Основные технические условия для гидрогенератора. Гидроагрегат со стороны генератора приписан к распределительной электрической сети со стороны турбины связан с источником якой 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 возбудителя 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 механической требования определяются типом конструкции рабочего колеса турбины и характеристикой гидроэнергетического сооружения; эти требования касаются: 1) угонной скорости вращения; 2) махового момента ротора; 3) осевого давления на подпятник.

Отношение угонной скорости вращения гидротурбины 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 подпятник 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  $\cos \phi = 1$ .

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

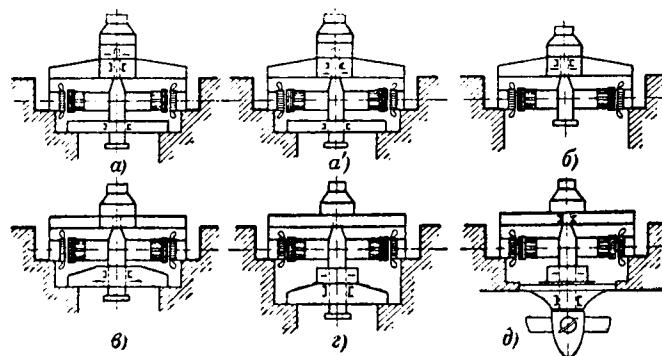


Рис. 8. Компоновка основных узлов гидрогенераторов.  
 а—подвесное исполнение генератора с двумя направляющими подшипниками; б—то же, но с одним направляющим подшипником под ротором генератора, без нижней крестовины, в, 2, 3, 4—электрическое исполнение генератора: в—с одним направляющим подшипником, расположенным под ротором, над подшипником; г—с одним направляющим подшипником, расположенным под ротором, под подшипником; д—с подшипником на крышки турбины и с одним направляющим подшипником, расположенным над ротором; е—с подшипником на крышки турбины и с одним направляющим подшипником, расположенным под ротором (на рисунке не показан).

новных 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 зависимая 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 гидрогенераторы разделяются на подвесные, у которых подпятник расположен над ротором генератора и зонтичные 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 осуществляется 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. 8.6).

В тихоходных машинах подвесного типа, с различием диаметра статора удлиняется нижняя грузонесущая крестовина и одновременно с тем растет осевая нагрузка на нее. Крестовина утяжеляется и становится весьма громкой.

С целью снижения веса крестовины и сокращения высоты агрегата применяют конструкцию генератора зонтичного типа с подпятником, положенным под ротором генератора. Тогда вес грузонесущей крестовины определяется диаметром шахты под генератором, который в значительной мере 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 с ротором и вне зоны действия подъемного жгута затрудняется; 2) диаметр подпятника увеличивается, так как он должен пропустить сквозь себя фланец вала генератора при сборке и разборке. Увеличиваются также потери в подпятнике (на 20—25 %).

Модификация этой конструкции (рис. 8.2), направляющий нодшипник генератора под рулевым помещен ниже под пятника, имеет то преимущество по сравнению с конструкцией рис. 8.1, что ванна под пятника служит лишь резервуаром для масла и не воспринимает радиальных усилий.

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

При большой высоте агрегата не всегда можно ограничиться одним направляющим шипником, расположенным под ротором, иникает необходимость установки второго шипника над ротором гидрогенератора.

В последнее время применяется конструкция с подпятником, расположенным на крышке турбины, являющаяся дальнейшим развитием зигзагообразной конструкции. В этом случае гружене крестовина отсутствует, а для восприятия осевого давления крышка турбины и направляющий аппарат соответственным образом усилены (рис. 8.11). Такая конструкция применяется с целью дальнего сокращения высоты агрегата. Экономия стоимости агрегата при этом незначительна, так как снижение стоимости генератора поглощается увеличением стоимости турбины из-за усиления крышки и направляющего аппарата. Однако стоимость строительной части сооружения стаций 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 дать весьма значительную экономию стоимости сооружения, поэтому выбор типа конструкции должен быть обоснован расчетами стоимости всего сооружения станции в целом.

ли стоимость строительной части сооружения остается практически одинаковой как зонтичном типе конструкции, так и при подом, то предпочтение должно быть отдано зонтичному типу.

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

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

Кроме того, по условиям регулирования турбины, а также для создания необходимой динамической устойчивости генератора при неуставшихся 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 угловой скорости вращения гидроагрегата<sup>6</sup>.

Для тихоходных машин большой мощности сообразно увеличивать диаметр ротора до предела, ограниченного механической прочностью машины. Увеличением диаметра ротора достигается лучшее охлаждение машины и снижение веса ротора при заданном маховом моменте. С этой точки зрения снижение угловой скорости вращения гидроагрегата оказывает весьма существенное влияние на стоимость гидрогенератора. Конструкция ротора гидрогенератора состоит из статора, остава, обода и полюсов (рис. 4).

Обод ротора передает вращающий момент от полюсов к полюсной системе генератора, воспринимает осевые усилия от веса вращающихся частей гидроагрегата и от реакции воды.

Обод генератора должен быть достаточно жестким, чтобы исключить возможность возникновения резонансных поперечных колебаний при различных угловых скоростях вращения. Обычно обеспечения жесткости диаметр вала выбирается большим, чем это требуется по расчету на прочность, вследствие этого материал вала имеет большие механические напряжения, допускающие применение при изготовлении вала простых юстировочных сталей.

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

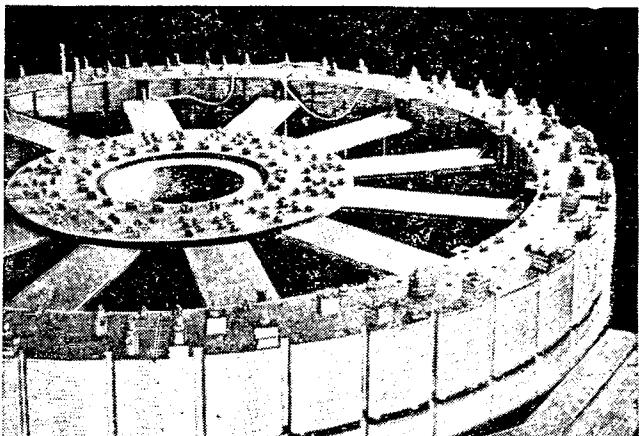


Рис. 9. Спецевой остав ротора с шихтованным ободом.

Остав ротора, как правило, выполняется сварным и, редко, литьим. Вследствие больших моментов вращения, передаваемых оставом 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 остава ротора достигают по диаметру 10 м и более, поэтому конструкция его должна предусматривать возможность транспортировки частями. Применяются два типа конструкций оставов ротора — дисковые и спицевые, разборные, применяемость которых определяется габаритными размерами оставов. До 4 м в диаметре применяются неразъемные дисковые оставы, до 8 м диаметром могут применяться разъемные дисковые и свыше 8 м диаметром — спицевые разборные оставы роторов. Дисковые оставы роторов имеют наиболее простое устройство и легко воспринимают усилия вращающего момента. Спецевые разборные оставы более трудоемки, так как болтовое крепление каждой спицы (рис. 9) к диску должно быть рассчитано на передачу соответственной доли вращающего момента.

Остав 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 ободе возникают большие центробежные усилия от собственного веса и веса укрепленных к ободу полюсов. На восприятие этих усилий при угловой 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 отштампованных 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

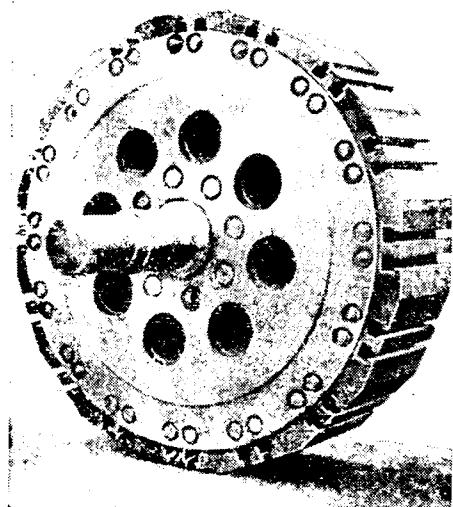


Рис. 10. Остов ротора быстроходного гидрогенератора.

ободе при угловой скорости вращения получаются 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 угловой 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 усиlena.

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 штампованным ободам 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.

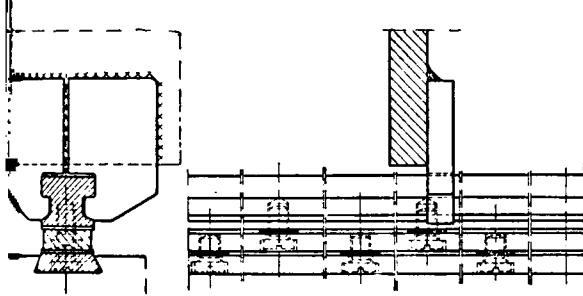
Опыт работы ряда гидрогенераторов без успокоительных обмоток на электростанциях не выявил существенных недостатков в эксплуатации, связанных с отсутствием успокоительных обмоток. Вместе с тем на отдельных гидрогенераторах выявилась уязвимость успокоительных устройств в эксплуатации и в ряде случаев вместо аварии. Учитывая практические трудности осуществления успокоительных обмоток для роторов больших габаритов, при решении вопросов их применения 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 деформации при угловой скорости вращения. Термическая устойчивость успокоительных обмоток и возможность возникновения резонансных вибраций, вызванных знакопеременным моментом обращенного поля, накладывает некоторые ограничения на допустимые несимметричные размы 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 промышленного типа корпус передает на фундамент давление, 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 кольцо отдельные секторы должны представлять собой монолитную конструкцию, противостоящую электромагнитным вибрациям, вызываемым работающим магнитным потоком, а также кавитации, возникающей 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, однако 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 особо прочное 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).



II. 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, обеспечивая правильное положение магнитного сердечника в машине.

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

Из условий надежности витковой изоляции вторые обмотки рекомендуется выполнять ержевого типа с числом эффективных проводников в пазу 2, для гидрогенераторов средней мощности выполняются также обмотки катушечного типа с числом эффективных проводников в 3-4 раза 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 микаленты с компаундированной давлением после вакуумной сушки. Эта изоляция хорошо противостоит увлажнению и менее подвержена разрушению от коронирования. Целью снижения коронирования и сохранения ружного слоя изоляции применяются покрытия ружной поверхности обмотки полупроводящими лаками в пазовой части и в лобовых частях обмотки у выходов из крайних пакетов.

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

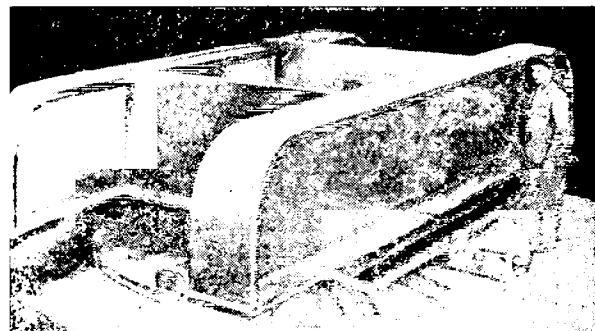


Рис. 12. Мостовая крестовина.

высокой механической прочностью и надежно выдерживают усилия при коротких замыканиях.

Крестовины, воспринимающие и передающие на фундамент осевые усилия, называются грузонесущими. Для соединения врачающегося ротора с неподвижными крестовинами применяются подшипники и подпятники; подпятники для восприятия осевых усилий и подшипники для радиальных. Крестовины также служат для размещения вспомогательных устройств: возбудителей, комбинатора турбины, тормозных устройств и др. Крестовины должны быть достаточно жестки и прочны 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 сложней. 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-

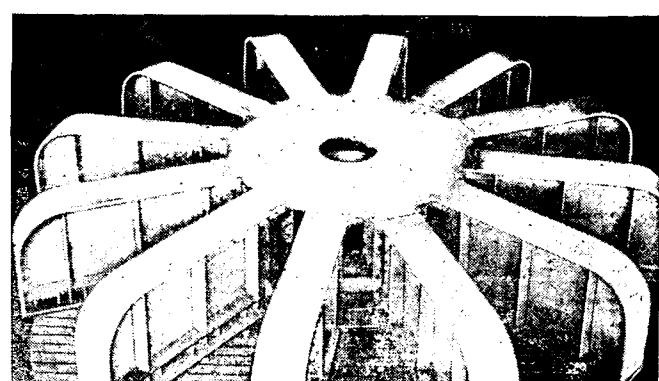


Рис. 13. Лучевая крестовина.

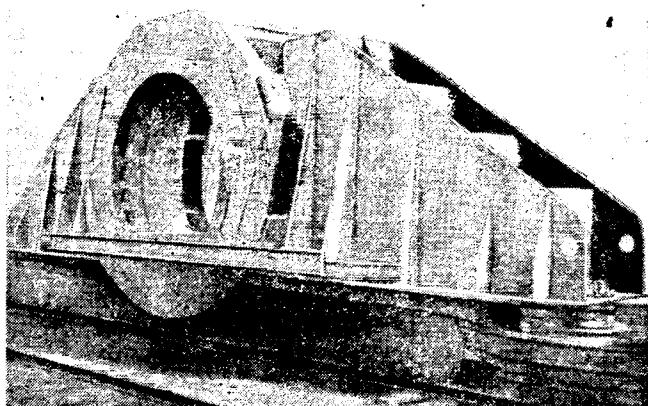


Рис. 14. Центральная часть грузонесущей крестовины на транспортере.

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

По расходу материала оба типа крестовин примерно равнозначны. Невоспринимающие осевых нагрузок крестовины, в которые встраивают 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).

*Под пятники 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 под пятнику достигают свыше 2000 т, а усилия на подшипники свыше 300 т. При таких больших нагрузках под пятники 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 тряся металлические поверхности при вращении соприкасаются друг с другом, а их разделяющий слой жидкости смазки. Если масляная пленка нарушается, то жидкостное трение переходит в полусухое или сухое, при котором сопротивление трению резко увеличивается.

Теория под пятников изучает условия возникновения и устойчивости масляной пленки.

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

$$P_t = \lambda S \frac{dv}{dh} [kg],$$

где  $\lambda$  — абсолютная вязкость жидкости,  $kg \cdot sec$ .

$S$  — поверхность жидкостного слоя ( $m^2$ ), ключенного между двумя поверхностями движущимися относительно друг друга со скоростью  $v$   $m/sec$ ;

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

Если сравнить этот закон с законом сопротивления трения твердых тел, где сопротивление трению  $P_t = \mu P$ , то увидим, что законы жидкостного и сухого трения различны: 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 под пятникам 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 трящихся поверхностей (предполагается, что  $\frac{dv}{dh} = const$ ).

2. Между этими тремя факторами 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 изменяется. Давление на под пятнику 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 как работоспособность под пятника или подшипника определяется его тепловым балансом и минимальной толщиной смазочного слоя для получения жидкостного трения.

3. Основная задача при конструировании под пятников или подшипников заключается в

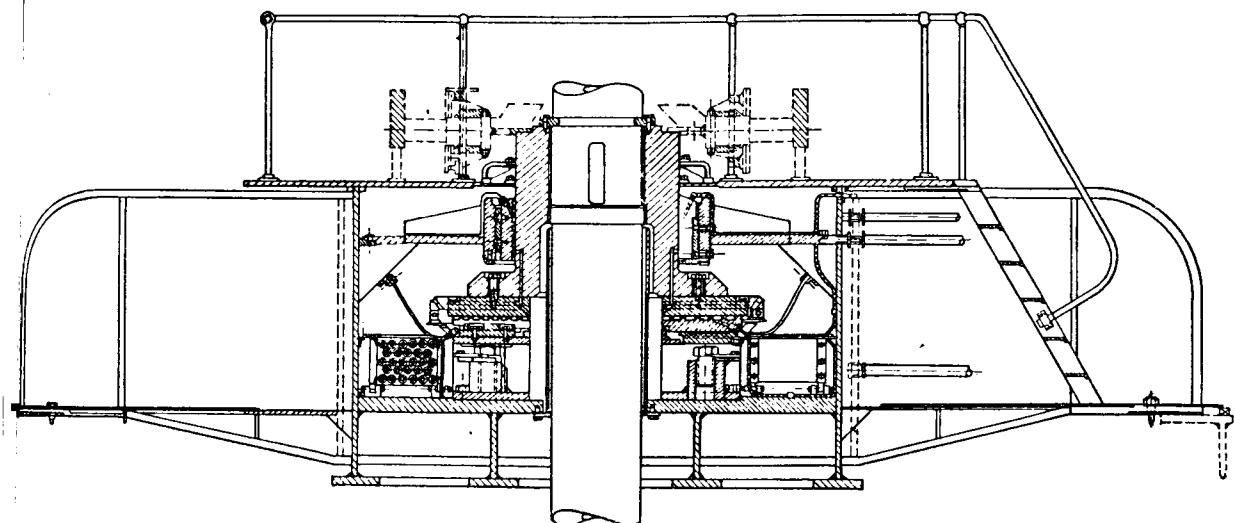


Рис. 15. Подпятник.

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

Современные подпятники строятся таким образом, что сегменты<sup>7</sup> имеют возможность изменять угол наклона между плоскостями трения. 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 сегментовложен в основу проектирования наиболее совершенных современных подпятников.

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

Текстолитовые подпятники, которые обычно стоят 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 стально-го 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.

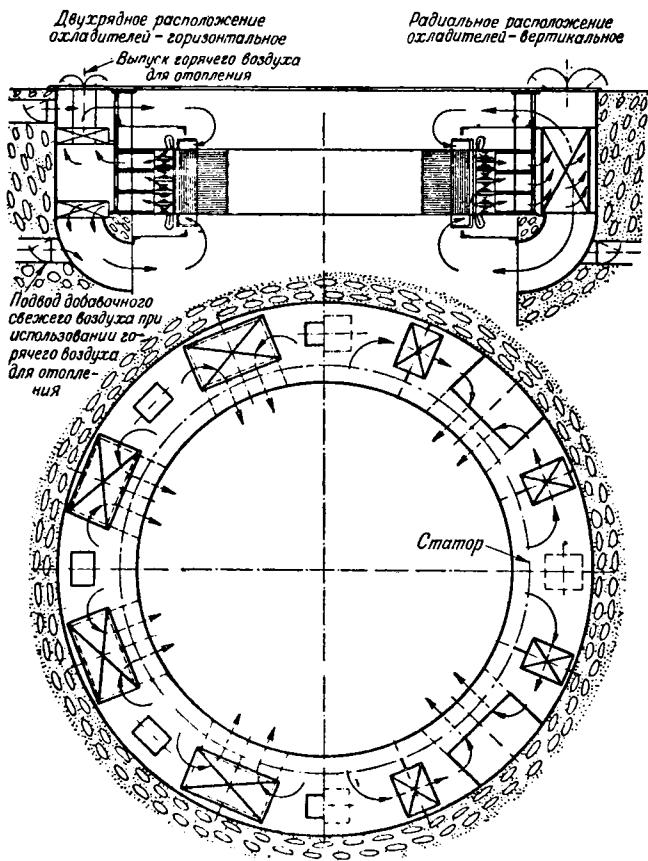


Рис. 16. Схема охлаждения гидрогенератора при замкнутом цикле.

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 различаются три различных режима работы подпятника: 1) режим пуска и остановки, 2) нормальный режим и 3) работа при угловых 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 выывает 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 угловой 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 подшипников. У горизонтального подшипника направление приложения нагрузки вполне определенное, и в этом направлении можно предусмотреть несущую верхность, а остальную часть окружности втульи 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 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 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 само смазке 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 рабо-

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

Следствие тихоходности гидрогенераторов отличается малой интенсивностью охлаждения и более низким использованием активных материалов.

Потребление сохранить высокий к. п. д. гидрогенераторов исключало необходимость форсированного охлаждения путем применения схем с искусственной вентиляцией с установкой отдельных вентиляторов. К тому же реализация искусственных схем охлаждения для гидрогенераторов представляет значительные трудности вследствие широких габаритов генератора и сложности освоения воздушных уплотнений воздухоохладителей.

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

К этим мероприятиям можно дать следующее обоснование.

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 вентилирующей способности ротора.

Как известно, в синхронных машинах с явно выраженным полюсами при радиальной системе вентиляции основным источником напора служит ротор, точнее — его полюсная система. Полюсы ротора, закрепленные на ободе, 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 уменьшается и напор, создаваемый ротором, уже может обеспечить должного расхода воздуха. Построенные к ротору вентиляторы также в изнанной мере обладают этим свойством, если они турбовентиляторного типа.

Недостаточный вход воздуха с торцов ротора ограничивает возможности любых пристроенных торцов вентиляторов и применение их не может решить задачи обеспечения необходимого расхода воздуха для охлаждения гидрогенератора.

Поэтому при возрастании габаритов гидрогенератора

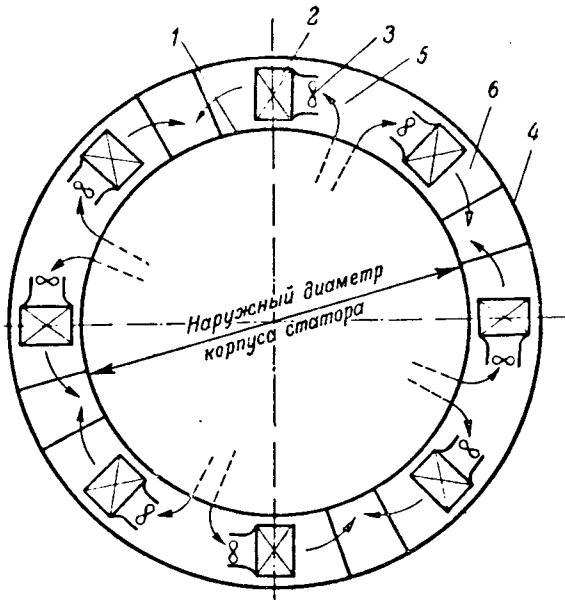


Рис. 17. Схема охлаждения гидрогенератора с добавочными вентиляторами.

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

генератора как по диаметру, так и по длине настоятельно необходимо открыть доступ воздуха по всей длине машины через радиальные каналы в ободе 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 вентилирующего действия каналов в ободе 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 ободе ротора снижает его прочность; 2) выход воздуха из каналов в ободе 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 прижимаются к тормозным дискам, укрепленным на роторе генератора. Обычно тормоза используют также и для подъема ротора на небольшую высоту (в пределах 10—20 мм), который бывает необходим при ревизии под пятника или постельной стоянки генератора, для смазывания смазывающихся поверхностей маслом. Подъем ротора осуществляется подачей масла в систему тормозных цилиндров при помощи насоса высокого давления.

**Заключение.** Приведенный выше краткийзор 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 симметрических накладываемых на гидрогенератор при его проектировании, затрудняется унификация типов и конструкции 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 под пятники крупных гидрогенераторов достигает 2 000 т и более в связи с чем конструкция и технология изготовления таких под пятников требуют особо тщательной проработки на основе изучения работы под пятников в эксплуатации и на моделях.

6. Снижение угловой скорости вращения гидрогенераторов весьма целесообразно с точки зрения выбора оптимальных соотношений, повышающих использование материалов в гидрогенераторе.

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

8. Система возбуждения гидрогенераторов с применением электромашинных 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 ВИЭСХ, ЛВС Ленэнерго

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

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

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 антenna 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.

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

$$U_s = U_{\phi 1} \frac{C'_1}{C'_1 + C'_2} \times$$

$$\times \frac{C_{14} - \frac{1}{2}(C_{24} + C_{34}) - j \frac{\sqrt{3}}{2}(C_{24} - C_{34})}{C_{14} + C_{24} + C_{34}}, \quad (5)$$

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 электротергии 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.

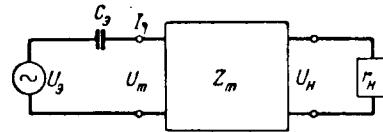


Рис. 1. Эквивалентная расчетная схема емкостного отбора мощности.

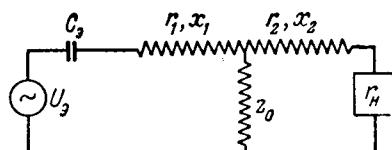


Рис. 2. Расчетная схема емкостного отбора мощности со специальным трансформатором, представленным в виде Т-образной эквивалентной схемы замещения.

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  $r_H$ .

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

где

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

—коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания;  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $r_H$  — 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 $\frac{r_1 + ar_h}{a_1 r_h} = 1$
Напряжение трансформатора (антенны)	$U_m = U_s \frac{Z_m}{Z_m - j \frac{1}{\omega C_s}}$ (6)	$U_m = U_s \frac{Z_1 + ar_2 + ar_h}{r_1 + ar_2 + ar_h}$ (6a)	$U_m = U_s \left[ 1 + j \frac{x_m}{a_1 r_h (1 + t)} \right]$
Ток первичной обмотки трансформатора	$I_1 = U_s \frac{1}{Z_m - j \frac{1}{\omega C_s}}$ (7)	$I_1 = U_s \frac{1}{r_1 + ar_2 + ar_h}$ (7a)	$I_1 = U_s \frac{1}{a_1 r_h (1 + t)}$
Ток нагрузки потребителя	$I_h = U_s \frac{a}{Z_m - j \frac{1}{\omega C_s}}$ (8)	$I_h = U_s \frac{a}{r_1 + ar_2 + ar_h}$ (8a)	$I_h = U_s \frac{1}{r_h (1 + t)}$
Напряжение на зажимах потребителя	$U_h = U_s \frac{ar_h}{Z_m - j \frac{1}{\omega C_s}}$ (9)	$U_h = U_s \frac{ar_h}{r_1 + ar_2 + ar_h}$ (9a)	$U_h = U_s \frac{1}{1 + t}$
Мощность потребителя	$P_h = U_s^2 \frac{a^2 r_h}{\left( Z_m - j \frac{1}{\omega C_s} \right)^2}$ (10)	$P_h = U_s^2 \frac{a^2 r_h}{(r_1 + ar_2 + ar_h)^2}$ (10a)	$P_h = U_s^2 \frac{1}{r_h (1 + t)^3}$ (10b)

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 сколько-нибудь 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 (6б)...(10б) 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, независящая 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 (6б), 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 отличные 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, а 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 сопротивленной антенне). Пользуясь уравнением (6б), ее можно представить в виде:

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

При антенном отборе

$$k = 1 + j \frac{P_h (1 + t)}{\omega (C_1' + C_2') I_a U_s^2}. \quad (16)$$

Задаваясь кратностью  $k$ , изменением напряжения у потребителя  $1 + t$ , нагрузкой потребителя  $P_h$  и параметрами антенны  $U_s$ ,  $(C_1' + C_2')$ , можно определить необходимую длину антенны:

$$l_a = \frac{P_h (1 + t)}{a \omega (C_1' + C_2') U_s^2 \sqrt{k^2 - 1}}. \quad (17)$$

На рис. 3 приведены кривые зависимости длины антенны (с обычным для грозозащитного троса линии 220 кв сопротивлением  $x_C \approx 290$  комма)

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

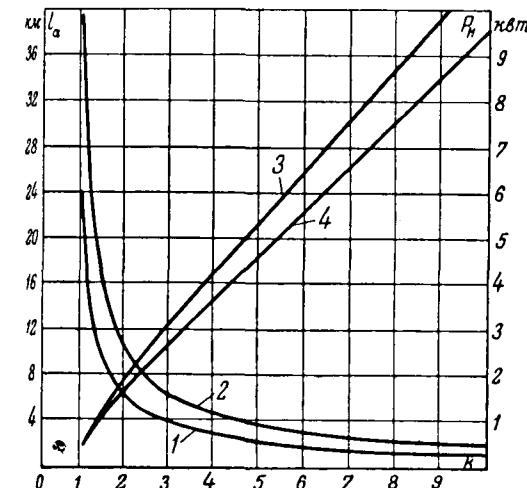


Рис. 3. Зависимость длины антенны  $l_a$  и мощности нагрузки  $P_H$  от кратности роста напряжения  $k$ .  
 $1 - f(k)$  при  $P_H = 3 \text{ квт}$  и  $\Delta U = \pm 10\%$ ;  $2 - l_a = f(k)$  при  $P_H = 3 \text{ квт}$  и  $\Delta U = \pm 10\%$ ;  $3 - P_H = f(k)$  при  $l_a = 3,5 \text{ км}$  и  $\Delta U = \pm 5\%$ ;  
 $4 - P_H = f(k)$  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 наивыгоднейшие значения кратности для величин мощности нагрузки лежат в пределах  $k = 3 \dots 3,5$ .

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

$$P_H = \frac{U_s^2 l_a (C_1' + C_2') \omega V^{k^2 - 1}}{1 + t}. \quad (18)$$

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

Изложенное позволяет кратко сформулировать основные требования к трансформатору, который должен: 1) иметь постоянное и численно определенное значение  $x_m$  в выбранном диапазоне нагрузки или диапазоне кратности роста напряжения; 2) поддерживать постоянным (в пределах допускаемого изменения) напряжение у потребителя, т. е. иметь автопеременный, зависящий от нагрузки и кратности  $k$  коэффициент сформации 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 условиях применения дополнительного индуктивного сопротивления, которое включается параллельно с первичной обмоткой, или по-

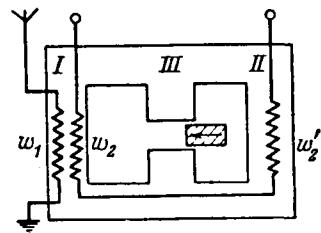


Рис. 4. Эскиз опытного образца специального трансформатора для емкостного отбора мощности от высоковольтных линий электропередачи.

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-

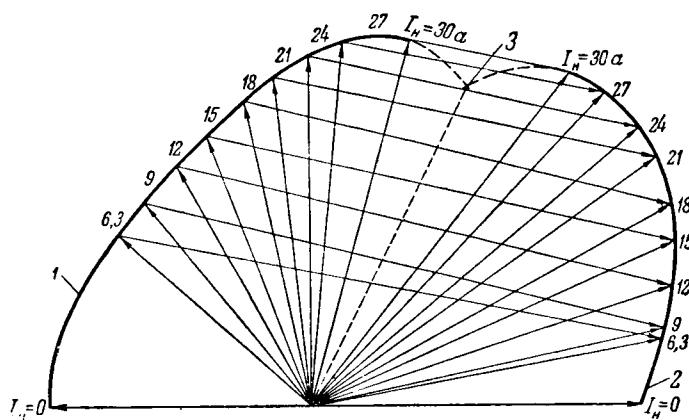


Рис. 5. Диаграмма изменения векторов напряжения обеих частей вторичной обмотки ( $w_2$  и  $w_2'$ ) трансформатора в зависимости от тока нагрузки  $I_h$ .

1 — геометрическое место концов вектора напряжения  $U_2$  (часть вторичной обмотки  $w_2$ ); 2 — геометрическое место концов вектора  $U_2'$  (часть вторичной обмотки  $w_2'$ ); 3 — точка короткого замыкания. Вектор напряжения нагрузки  $U_h = U_2 - U_2'$ .

нитного шунта. В итоге результирующее напряжение вторичной обмотки, а следовательно, и напряжение на зажимах нагрузки поддерживаются постоянными. Напряжение на обмотке  $w$ , 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 возрастало 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 возрастило 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 трансформа-

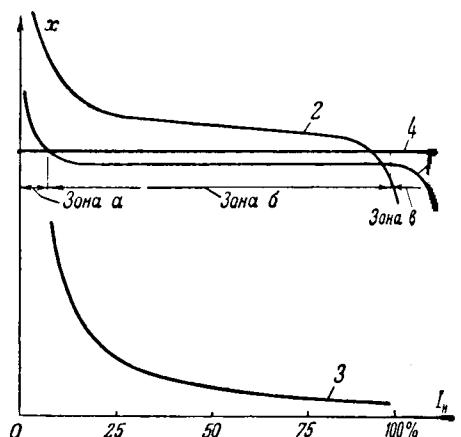


Рис. 6. Зависимость емкостного сопротивления  $x_c$  и сопротивления трансформатора  $x_m$  от тока нагрузки  $I_h$ .

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

тору, сопротивление  $x_m$  которого отличалось большим постоянством. Вторичное напряжение этого трансформатора при больших токах нагрузки 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  $a$ , 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  $x_m$  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  $b$  кривой 1 (рис. 6). По мере роста тока  $I_h$  напряжение  $U_m$  растет в соответствии с 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 кривой 1 (рис. 6), характерно соотношение сопротивлений:  $x_m \approx x_1 + ax_2 < x_c$ . По мере приближения к режиму короткого замыкания разница между величинами  $x_m$  и  $x_c$  возрастает и при коротком замыкании  $x_m \ll x_c$ . Вследствие резкого падения 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 если равенство  $x_m = x_c$  наступает при малых значениях тока нагрузки, когда  $k \approx 1$  (кривая 1 рис. 6), и если зона  $b$  кривой  $x_m = f(I_h)$  проходит несколько ниже кривой 4, то установка работает устойчиво во всем диапазоне нагрузок. Если же равенство

$x_c$  наступает при больших величинах  $na$  (кривая 2), когда  $k > 1$  и индукция в сердечнике возрастает, то трансформатор переходит в зону феррорезонанса, который характеризуется резким и опасным повышением напряжения. Таким образом, в дополнение к сформулированным выше требованиям необходимо, чтобы пересечения кривых  $x_m = f(I_n)$  и  $x_c = f(I_n)$  находились в зоне самой минимальной нагрузки, чтобы зона  $a$  кривой  $x_m = f(I_n)$  имела возможно более крутой спад, а прямолинейная зона  $b$  располагалась возможно ближе к  $x_c = f(I_n)$ , но ниже ее. Только при выполнении этого требования исключается возможность феррорезонанса.

метим попутно, что при коротком замыкании  
жимах вторичной обмотки трансформатора  
не превосходит 1,6 . . . 1,8 номинального  
ходимость защиты трансформатора от сверх-  
отпадает. Это объясняется тем, что уста-  
выхходит из резонанса (зона  $\delta$  кривой 1,  
6) и напряжение трансформатора и антенны  
ается.

следование зависимости сопротивления форматора от тока нагрузки, помимо выяснения физической стороны явлений, позволило изиться к осуществлению тех требований информатору, которые были изложены выше. Приближение достигнуто путем перевода всех участков магнитопровода в область их индукций, а также путем изменения щиения между сечениями стержней и числовиков обмоток. Кроме того, были установлены конструктивные закономерности и выработаны расчета основных элементов трансформатора.

ные одной из последних конструкций форматора (рис. 7) и данные первоначальной конструкции (рис. 4) приведены в табл. 2. Принцип действия трансформатора (рис. 7) которым упрощением можно представить себеющим образом. По мере роста нагрузки тяжелый поток, создаваемый в стержне  $I$  током  $I$ ной обмотки, растет по закону  $\Phi_1 = k\Phi_0$  сением напряжения в первичной обмотке пре-  
гаем). По этому же закону возрастает и с.  $E_2$ , которая наводится во вторичной об-

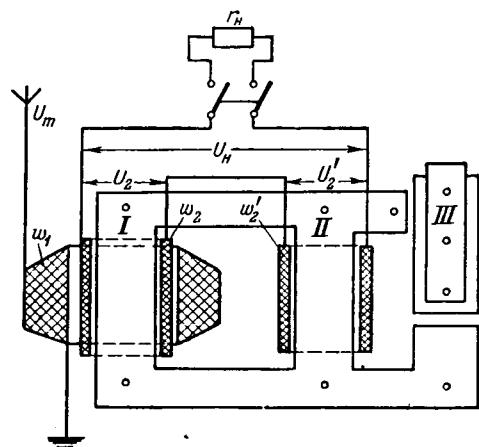


Рис. 7. Специальный трансформатор для емкостного отбора мощности более современной конструкции.

мотке  $w_2$ , расположенной на стержне I. Электродвижущая сила  $E'_2$  обмотки  $w_2$ , расположенной на стержне II, непрерывно уменьшается, так как ток нагрузки, протекая по обмотке  $w'_2$ , создает поток, направленный против главного потока  $\Phi_n$  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.

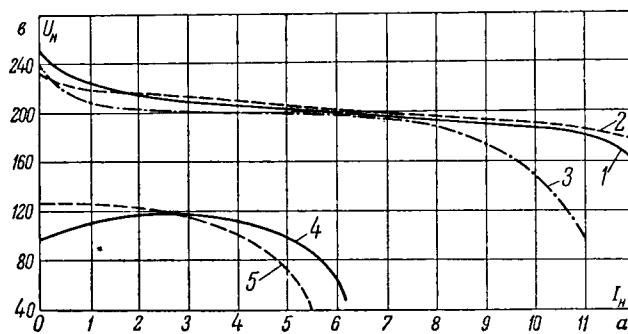
Соответствующим выбором числа витков  $w_2$  и  $w'_2$  удается стабилизировать напряжение на зажимах потребителя  $U_n = U_2 + U'_2$  в необходимых пределах. Вследствие большого рассеяния обмотки  $w'_2$ , т. е. большой величины  $x'_2$ , реактивное сопротивление  $x_m \approx x_1 + ax_2$  при изменении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

Таким образом, основной поток  $\Phi_1$ , создаваемый 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, вт		Число витков			Потери в меди, вт				
	стержней			Ярма	k=1		k=3				k=1	k=3	w <sub>1</sub>		w <sub>2</sub>					
	I	II	III		I	II	I	II			w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub> '							
шт 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			
шт 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  $U_H = f(I_H)$ .

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

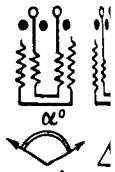
(трансформаторный режим). Затем, будучи вытеснен из стержня  $II$  потоком, созданным током нагрузки, он замыкается через стержень  $III$  с шунтом, в котором ток обмотки  $w_2$  создает, кроме того, поток  $\Phi_{II}$  (реакторный режим). При полной нагрузке магнитный поток стержня  $III$   $\Phi_{III}$  складывается из потока  $\Phi_I$  и потока  $\Phi_{II}$ . На рис. 8 приведены опытные кривые  $U_H = f(I_H)$  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 заземленным.

**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	
	$U_m$ , кв	$x_C$ , ком/км	$P_H$ , вт/км	Эффективность, %	$U_m$ , кв	$x_C$ , ком/км	$P_H$ , 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	51,1
Изолирован и использован один трос (второй заземлен) . . . . .	4,43	11,6	453	501	124,5	775	60,9	54,3	8,7	463	467	42,1
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

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 используется. Результаты опытной проверки (напряжения, емкостные сопротивления, мощность, делящаяся на 1 км антенны при  $k=3,5$ ) приведены в таблице (см. приложение). В таблице приведена также эффективность схемы (светильная отбираемая мощность) в процентах. При определении эффективности схемы мощность отбираемая при использовании двух тросов равна 100%.

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

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

Приложение

# 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 зажиганий в мощных ионных цепях сильно зависит от скорости нарастания обратного напряжения вентиле после окончания коммутации. Как указалось [Л. 1], скорость нарастания обрат-

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.

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

Включение емкости приводит к увеличению тягических потерь в выпрямительной установке в некоторых схемах — создает угрозу погашения вентиля [Л. 2], поэтому значительное снижение скорости восстановления напряжения путем увеличения емкости установки не всегда возможно. Более эффективного снижения скорости восстановления напряжения можно достичь путем увеличения индуктивности цепи, что, по-видимому, снижения скорости восстановления напряжения, также ограничивает скорость нарастания гашения, 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 импульса разряда шунтирующей емкости на промежуток, лимитируемый индуктивностью подвода энергии от источников будет недостаточен для поддержания и развития силовой разряд будет подавлен.

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

из ферромагнитных материалов (холоднокатанная 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 напряжения 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 кривой ветви характеристики намагничивания (рис. 1, а, б). Следовательно, индуктивность цепи очень велика. Когда ток, достигнув максимального значения, начнет уменьшаться,

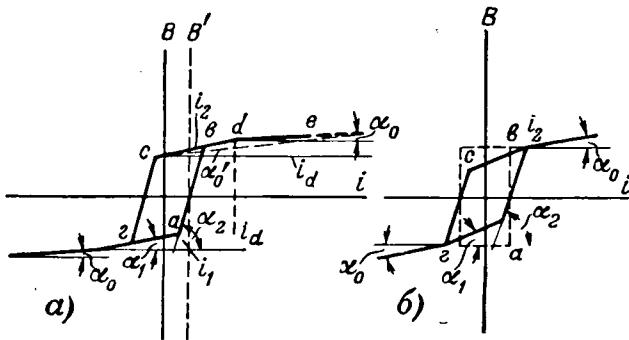


Рис. 1.

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

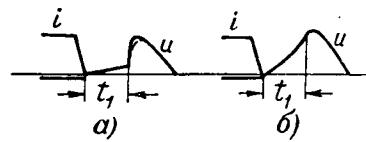


Рис. 2.

телях без дугогасящих устройств процесс идет иначе.

В контактных преобразователях Коппельмана обратный ток первоначально продолжает протекать через контакты, а не через емкость. Поэтому реактор (как и указывал Коппельман) недостаточен 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 первичивание реактора, напряжение почти не восстанавливается, появляется так называемая «держка» в восстановлении напряжения, которая практически начинается лишь после окончания перемагничивания реактора (рис. 2, a). Поэтому анализа процессов в схеме во время перемагничивания реактора Коппельман не приводит.

Для контактных преобразователей без дугогасящих устройств, применяемых при низких напряжениях, такие соотношения выполнимы с обязательным условием применения сердечников из дорогих материалов. Потери в контактах преобразователе 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 либо из обычных железо-никелевых сплавов (типа пермаллои).

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

Как показывают расчеты для выпрямителя, предложенное автором выполнение схемы, обеспечивающее ее работу в режиме, характеризуемом 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.

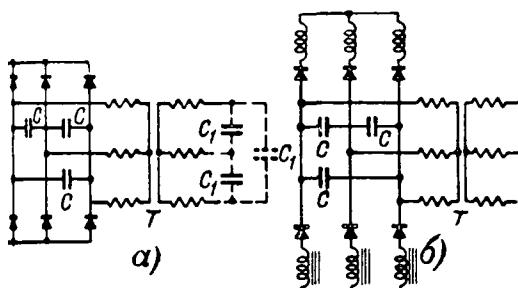


Рис. 3.

млемых значениях емкостей. Применение вентиков 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 позволяет существенно повысить мощность и надежность в работе ряда типов ионных вентилей умеренных дополнительных затратах. Большой эффект может быть достигнут в установках, которые должны обеспечить возможность больших углов регулирования, например приводы пресивных станов или шахтных подъемников. Для проверки влияния скорости восстановления обратного наряжения на работу вентилей на ядре ТВН УПИ были проведены исследования генератора при токах до 120 а и напряжении до 1. Исследования показали, что при больших х регулирования резкое снижение скорости стания обратного напряжения позволяет ичить выпрямляемый ток в 3 раза при проправных условиях. Наибольший эффект от применения насыщающихся реакторов в цепях с ионными вентилями получается в схемах ионных преобразований частоты (инверторов с конденсаторной коммутацией) (рис. 3). В этих схемах коммутация тока при зажигании очередного вентиля осуществляется разрядом током гасящего горящий вентиль конденсатора (рис. 3). Вследствие ничтожно малой индуктивности разрядной цепи конденсатора истание тока в зажигаемом вентиле до полной ячины, а следовательно, и прекращение его горения вентилем (т. е. коммутация) осуществляется во много раз быстрее, чем в выпрямительных установках (коммутация здесь длится 10-100 мсекунды или даже доли микросекунд). Время вследствие ничтожной индуктивности цепи коммутации восстановление обратного напряжения на погашенном вентиле также сходит с очень большой скоростью (рис. 4, б). Толь быстрое прекращение тока приводит к ярканию интенсивной ионизации, следовательно, и большой проводимости во время наряжения обратного напряжения, также происходит с очень большой скоростью. В результате пыльные токи могут достигнуть величины того порядка, что и прямой ток, вызывая интенсивное распыление анодов, частые погасания возбуждения в экскитронах [Л. 2] и частые

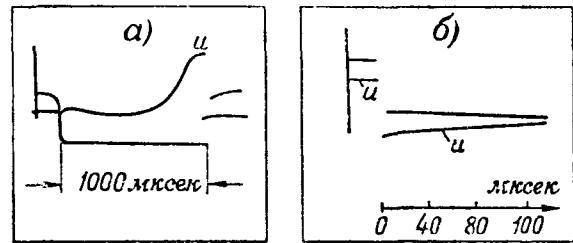


Рис. 4.

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, б), 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, изображенными 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

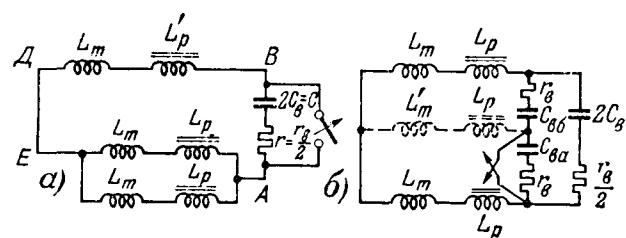


Рис. 5.

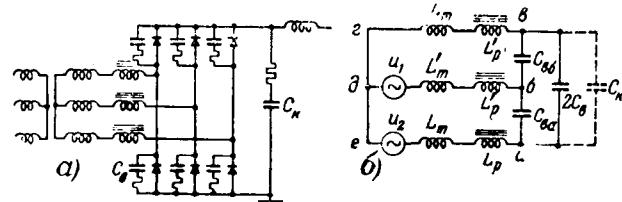


Рис. 6.

емкости  $C_b$ , 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  $C_{ba}$ ) 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 междуфазного 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 междуфазного 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  $bg$  симметричны.

Напряжение  $u_1$  восстанавливается в контуре  $\partial, b, a, e$ , рис. 6,б и в силу симметрии обеих ветвей  $b, a, e$  и  $b, g$  содержит одну частоту

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{(L_o + 0,5L_a^2)C_b}},$$

где  $L_b$  — индуктивность ветви  $b\partial$ ;

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

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

В силу симметрии обеих половин контура  $a, b, g, \partial, e$  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  $b\partial$  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  $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{2L_a \cdot 2,5C_b}}$ .

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

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

Таким образом напряжение, восстанавливающееся на емкости  $C_{ba}$  (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, включаемой на напряжение  $\frac{u_2}{2}$ . При этом токи, протекающие через  $L_m'$ , не зависят от напряжений, создаваемых на  $C_{ba}$  и  $C_{bg}$  токами с частотой  $\omega_2$ , так как отношению к точке  $b$  обе емкости получают одинаковый потенциал противоположного знака в колебаниях с частотой  $\omega_2$ , следовательно, воздействие на  $L_m'$  уравновешивается

Как следует из изложенного, для определения восстанавливающегося напряжения в схеме рис. 6,б с насыщающимися реакторами  $L_p$  можно 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 первую расчетную схему при наличии насыщающихся реакторов, зависит от характеристики материала сердечников. В момент, предшествующий прекращению тока в гасимом вентиле, индуктивность реактора гасимой фазы определяется наклоном характеристики сердечника в интервале (рис. 1,а). Во вступившей в работу фазе в этот момент протекает полный ток, следовательно, индуктивность реактора этой фазы, как и третей, определяется наклоном характеристики вблизи точки  $e$  (рис. 1,а).

Для большинства материалов динамический коэффициент самоиндукции при большом насыщении значительно меньше, чем перед прекращением 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 ( $u_2 < \frac{U_o}{2}$ ,  $u_1 > \frac{U_o}{2}$ ).

Соотношение между ними зависит и от соотношения между индуктивностями реакторов обеих фаз перед гашением дуги и индуктивностью 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 вентиляй.

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

В соответствии с рис. 1.

$$\frac{L_n}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{L_n}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{L_o}{\operatorname{tg} \alpha_o}, \quad \operatorname{tg} \alpha_o = \frac{w}{l} \mu_{\text{do}},$$

$\mu_{\text{do}}$  — динамическая проницаемость материала сердечника;  
 $l$  — длина сердечника.

Напряжение короткого замыкания трансформатора и щёлочной сети  $U_o$  обычно составляет 5...15% на фазу, может быть и больше. Во избежание чрезмерного уменьшения коэффициента мощности выпрямительной установки напряжение короткого замыкания реактора в начальном состоянии должно быть ограничено, и в большинстве случаев нецелесообразно его брать превосходящее 2...3%.

Таким образом,  $L_o$ , 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, нет выполнено без учета  $r$ . В дальнейшем показано, что и есть его влияние.

Операторное уравнение для схемы рис. 5,а при начальных данных  $i_c = i_1$  и  $u_c = U_1$  будет

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

которого получим:

напряжение на емкости

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

ток через емкость

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

Так как при  $u_c = U_o$ ,  $i_c = i_{c \text{ макс}}$ , то при  $i_{c \text{ макс}} \leq i_2$ , (I,2) и (I,2') получим<sup>2</sup>:

$$\omega_2(t_2 - t_1) = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\sqrt{U_o^2 - i_1^2 \frac{L_1}{C}}}{i_1 \sqrt{\frac{L_2}{C}}}, \quad (I,3)$$

$$i_{c \text{ макс}} = \sqrt{\frac{C}{L_2} U_o^2 + i_1^2 \frac{L_2 - L_1}{L_2}}, \quad (I,3')$$

$t_1$  — время заряда емкости до напряжения  $U_o$ .

Если  $i_{c \text{ макс}} = i_2$ , то при  $t > t_1$

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

здесь видно, что амплитуда напряжения, восстанавливавшегося на вентилях непосредственно после его погашения, в этом случае может превысить  $U_o$  не более чем  $i_2 \sqrt{\frac{L_1}{C}}$ . В действительности перенапряжений в этом случае практически не получается, так как неучтенные в сопротивлении обмотки и на вихревые токи вызывают дополнительные демпфирования колебаний. Смотрим работу вентиля с регулированием, когда скажем, что напряжение возрастает до  $kU_o$ , где  $k = \frac{\sin(\alpha + \gamma)}{\sin \gamma}$ . Необходимо учесть, что вследствие увеличения вихревых токов величина  $i_1$  также возрастает и  $\operatorname{tg} \alpha_2$  меняется.

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

В этом случае

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

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

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

$$\omega_1(t_3 - t_2') = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{kU_o - U_2'}{i_2' \sqrt{\frac{L_1'}{C}}}, \quad (I,5)$$

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

$t_3$  — момент, когда  $u_c = U_o$ ;

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

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

$$\Delta U = i_{c \text{ макс}} \sqrt{\frac{L_1'}{C}} = \sqrt{(kU_o - U_{c2}')^2 + i_2'^2 \frac{L_1'}{C}}. \quad (I,6)$$

В уравнениях (I) — (6)

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

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 восстанавливавшегося 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 (I,1) ... (I,5)  $i_1$  и  $i_2$  необходимо заменить их значениями из (I,7).

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

$$\frac{w}{l} = \sqrt{\frac{L_2 H_2^2 - (L_2 - L_1) H_1^2}{C U_0^2}}, \quad (I,8)$$

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

$$V \bar{C} = \frac{t_2}{t_1} = \frac{V \bar{H}_2^2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{H_2^2}{H_1^2} - 1 + \sqrt{L_1} \arcsin \sqrt{\frac{L_1 H_1^2}{L_2 H_2^2 - (L_2 - L_1) H_1^2}}}}{V \bar{H}_1^2}, \quad (I,9)$$

$t_1$  и  $w$  должны также удовлетворять уравнению

$$\frac{w^2 s}{l} \mu_{\text{do}} = L_n$$

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

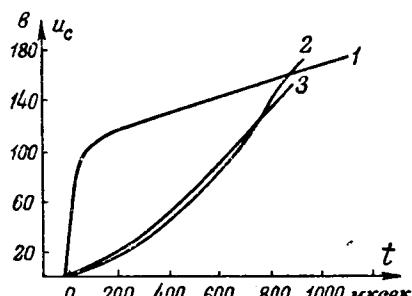


Рис. 7.

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

$$sl = \frac{L_h}{\mu_{d1}} \left( \frac{l}{w} \right)^2 [m^3]. \quad (I,10)$$

Таким образом, заданное время восстановления напряжения может быть получено только при определенных емкости, числе витков на единицу длины магнитопровода  $\frac{w}{l}$  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. 6,2. 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  $k'_0$ , то для определения параметров схемы величину  $\frac{w}{l} = f(c) = \frac{a}{\sqrt{c}}$ , 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  $\frac{w}{l}$ .

При наличии регулирования колебания восстанавливавшегося напряжения могут быть значительны, создавая заметные перенапряжения (I,6), что требует установки демпфирующих сопротивлений последовательно с емкостью. Перенапряжения в основном определяются нарастанием тока при насыщении 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 перемагничивания реактора  $L$ , 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 изменилось за время восстановления напряжения, и принималось равным  $u = U_m \sin \left( \gamma + \frac{t_2}{2} \right)$ . Если  $U_m \sin \left( \gamma + \omega t_2 \right)$  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:

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

$$t_2 = \sqrt{L_2 C} \arctg \frac{\sqrt{U_o^2 - \frac{H_1^2 l^2}{w^2} \frac{L_1}{C}}}{\frac{l}{w} H_1 \sqrt{\frac{L_2}{C} - a U_o \sqrt{L_2 C}}} +$$

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

из которых  $C$  и  $\frac{l}{w}$  могут быть определены по

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

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

и остается равным ему в течение всего времени перемагничивания реактора<sup>6</sup>. Для схемы выпрямления такой расчет соответствует предположению, что характеристика перемагничивания 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 остается постоянным, и напряжение на вентилях

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

Восстановление напряжения на вентилях закончено в момент  $t_o$ , когда оно становится равным мгновенному значению напряжения. Следовательно, в момент  $t_o$

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

откуда

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

Напряжение на реакторе во время восстановления напряжения

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

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

<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 перемагничивания реактора и включения 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  $L_h \gg L_o$ , так как в схеме рис. 5,6  $L_p = L_o$ .

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

$$t_o^2 = \frac{4B_s w^2 \rho}{l} \cdot \frac{C}{H_o - \frac{aU_o w C}{l}}, \quad (II,3')$$

$B_s$  — индукция насыщения.

При заданном времени восстановления напряжения  $t_o$

$$C = \frac{H_o t_o^2}{\frac{4B_s L_o}{\mu_{\partial o}} (1 + \frac{aU_o}{t_o}) + aU_o t_o^2}. \quad (II,4)$$

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

$$\frac{w}{l} = \frac{4B_s L_o}{\mu_{\partial o} t_o U_o} + \frac{H_o r}{U_o}. \quad (II,5)$$

При этом необходимо учесть, что при принятой характеристике перемагничивания (рис. 1,б) принципиально это 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 делящейся независимо так, как указывалось ранее, довольно (II,5) позволяет определить  $\frac{w}{l}$ , что в свою очередь позволяет найти и объем сердечника. С учетом получим:

$$sl = \frac{L_o}{\mu_{\partial o}} \frac{1}{\left( \frac{4B_s L_o}{\mu_{\partial o} t_o U_o} + \frac{H_o r}{U_o} \right)^2}; \quad (II,6)$$

$r \approx 0$

$$sl = \frac{U_o^2}{16 B_s^2 L_o} \frac{\mu_{\partial o}}{t_o^2}. \quad (II,6')$$

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

При наличии регулирования, когда схема включается напряжение  $kU_o$ , а перелом в кривой намагничивания

происходит при токе  $i'_o$ , из уравнений (II,1) и (II,3) (считая  $kU_o = \text{const}$ ) получим:

$$i'_o = C \left[ \left( \frac{kU_o}{i'_o} - r \right) - \sqrt{\left( \frac{kU_o}{i'_o} - r \right)^2 - \left( \frac{U_o}{i_o} - r \right)^2} \right]. \quad (II,7)$$

**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,

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

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  $i_o$  до пульевого значения, что для большинства материалов имеет место, ток достигнет установленного значения (при  $\text{tg} \alpha_1 = \text{const}$ )

$$i_{s0} = U_o \frac{\delta^2 \mu_{\partial 1}}{12 L_1 \rho}. \quad (III,2)$$

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

### Литература

1. М. М. Акодис. Нарастание обратного напряжения при коммутации в ионных вентилях. Электричество, № 6, 1950.
2. И. А. Кричевская, 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. Кастандони. Новые возможности в коммутации при преобразовании электрической энергии. L'Electrotechnica, № 4, 1945.
6. Ю. Г. Толстов. Электромагнитные процессы в выпрямительных установках с нелинейными алюминиевыми 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. По-

следние 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 nomogramмы. 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-

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

Однофазная печь в зависимости от

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 проходит с момента возникновения тока. Поэтому напряжение источника должно иметь начальную фазу

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

После перерыва ток в цепи возникает в тот момент времени, когда э. д. с. источника достигла 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:

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

Обозначив:  $\gamma = \frac{\omega L}{R}$  и  $\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + E^2}}$ , а также учитывая, что при  $t = 0$ ,  $i = 0$ , имеем

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

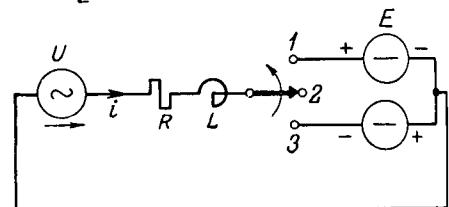


Рис. 1.



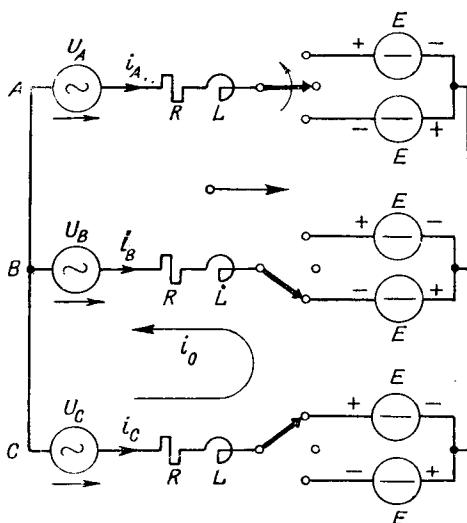


Рис. 3.

Примем за нуль момент возникновения тока в фазе  $A$  (рис. 3, 4). Контур, составленный фазами  $B$  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:

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

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

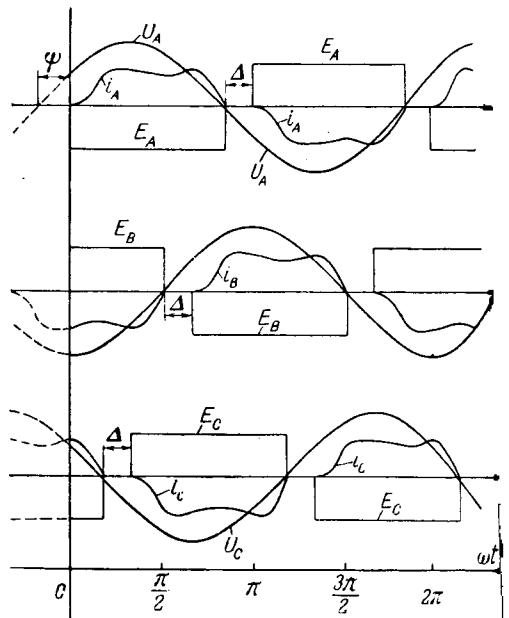


Рис. 4.

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

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:

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

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:

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

$\omega t = \frac{\pi}{3} - \Delta$  ток в фазе  $C$  обращается в нуль. Учтем трансцендентное уравнение, из которого можно определить продолжительность паузы  $\Delta$ :

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

Более удобная для расчета запись:

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

Результаты вычислений даны на рис. 5.

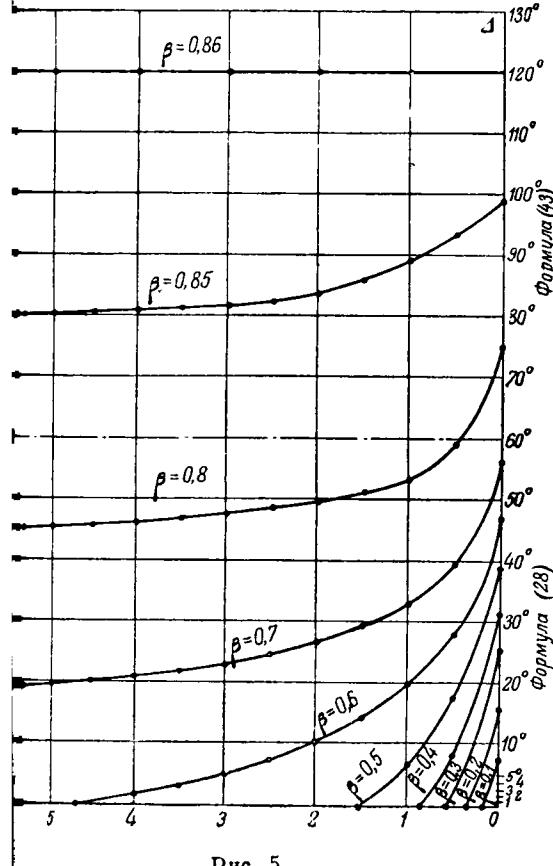


Рис. 5.

Учитывая (28), окончательно получаем:

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

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

Активная мощность, поступающая из сети по трем фазам:

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

и полезная мощность, потребляемая трехфазной печью:

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

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  $i_o$  могут быть получены из условий, что:

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

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

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

и начальное значение тока

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

Полезная мощность, потребляемая трехфазной печью,

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

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:

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

$$\begin{aligned}
 &+ \sin \varphi \left[ \frac{3}{2} \sin \left( \psi - \varphi + \frac{\pi}{6} \right) - \frac{\sqrt{3}\beta}{\cos \varphi} \right] \times \\
 &\times \left[ \sin \left( \psi + \varphi - \Delta + \frac{5\pi}{6} \right) e^{-\frac{2\pi}{3\gamma}} - \sin \left( \psi + \varphi + \frac{\pi}{3} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Учитывая равенство (42), получаем:

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

Полезная мощность, потребляемая трехфазной печью

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

Используя равенство (42), получаем:

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

#### Литература

1. С. И. Тельный. К теории трехфазной дуговой печи с непроводящей подиной. Электричество, № 12, 1948.
2. Ю. Е. Ефрович. Инженерные методы расчета дуговых печей с учетом нелинейности, вносимой дуговым разрядом. Электричество, № 12, 1948.
3. С. И. Тельный и Н. Т. Жердов. Осцилограммы 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. Сборник 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 чистым заполнением (33-Н, МКП-76 и др.) подвержены повреждениям, чем изоляторы их типов. По данным Сыромятникова [Л. 1],

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

Основной причиной повреждений мастиконаполненных изоляторов является образование дефектов в мастичном заполнении в виде раковин, ямок, включений, отслоения мастики от итого сердечника или фарфоровой рубашки изолятора. 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 мастиконаполненных изоляторов: радиическое измерение угла диэлектрических свойств и б) испытание повышенным напряжением, не обеспечивает обнаружения этих дефектов. В многих случаях поврежденные изоляторы до аварии нормальный  $\tan \delta$  и выдерживают длительное напряжение [Л. 2, 3].

В связи с этим возникла необходимость поисков метода испытаний, который, наряду с существующими, дополнит бы программу испытаний изоляторов в мастичном заполнении, а также судить о безопасности изоляторов на основании данных о расположении и размерах дефекта в изоляторах.

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

Работа, проведенная М. Е. Иерусалимовым с мастиконаполненными изоляторами [Л. 5], показала, что изоляторы с чистым заполнением (33-Н, МКП-76 и др.) подвержены повреждениям, чем изоляторы их типов. По данным Сыромятникова [Л. 1],

излагается разработанный в лаборатории техники высоких напряжений Киевского политехнического института метод рентгеновского исследования мастиконаполненных 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, обусловливающее 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

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

где  $J_o$  — 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

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

$A, B, C$  — 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:  $A = 2[\sqrt{2r_1x - x^2} - \sqrt{r_2^2 - (x - r_1)^2}]$ .

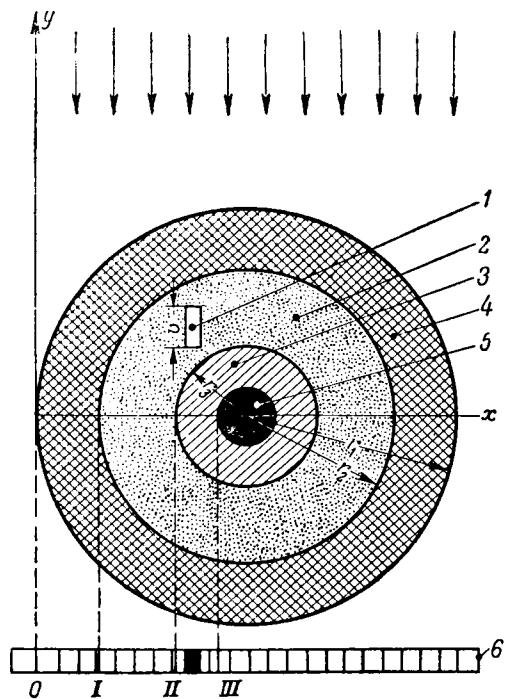


Рис. 1. Прохождение рентгеновских лучей через мастиконаполненный изолятор с гетинаксовым конденсаторным сердечником.

1—воздушное включение; 2—мастика; 3—гетинаксовый сердечник; 4—фарфоровая рубашка; 5—тоководящий 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

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

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  $\lambda_s = 0,3 \text{\AA}$ .

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 —  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{SiO}_2$ , кварц —  $\text{SiO}_2$ . По данным рентгенотехнических таблиц [Л. 6], находят коэффициенты

ослабления при  $\lambda = 0,3 \text{\AA}$  для всех составляющих 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 $\lambda = 0,3 \text{\AA}$

№ п/п.	Элементы	Молекулярный и атомный веса	Весовые доли $k$	Массовый коэффициент ослабления $\frac{\mu}{\rho}$ при $\lambda = 0,3 \text{\AA}$
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	0,46
5	Al	27	0,1	0,53
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  $\lambda = 0,3 \text{\AA}$  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  $\lambda = 0,3 \text{\AA}$  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)

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

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.

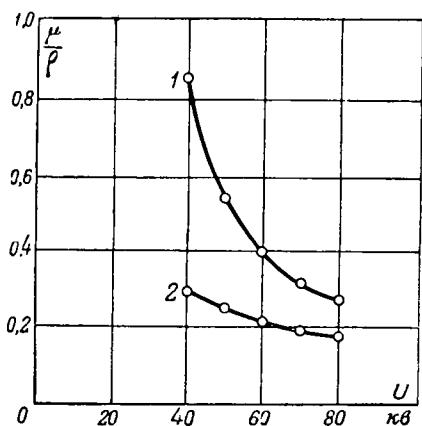


Рис. 2. Массовые коэффициенты ослабления для фарфора 1 и мастики 2 в зависимости от напряжения на рентгеновской трубке.

Полученная зависимость приводит к важному иду в отношении выбора величины напряжения на трубке для обеспечения отчетливого снимка сложной структуры, включающей исконно-внутренний дефект (воздушная полость). Имеем хорошей контрастности снимка для изолятора со структурой фарфор—мастика—гетин: 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 является 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 труже относительное изменение экспозиции аналитически может быть определено из условий получения рентгенограмм, обладающих одинаковой плотностью покернения.

Плотность покернения

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

$J$ —интенсивность падающих на пленку лучей;

$t$ —время просвечивания;

$k$ —коэффициент пропорциональности.

Приняв  $D$  постоянным, получим:

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

Приняв во внимание, что

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

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

ях:

$$2.5 \frac{2}{cm^3}, \rho_{\mu} = 0.9 \frac{2}{cm^3}, d_{\phi} = 4 cm, d_{\mu} = 6 cm,$$

(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,

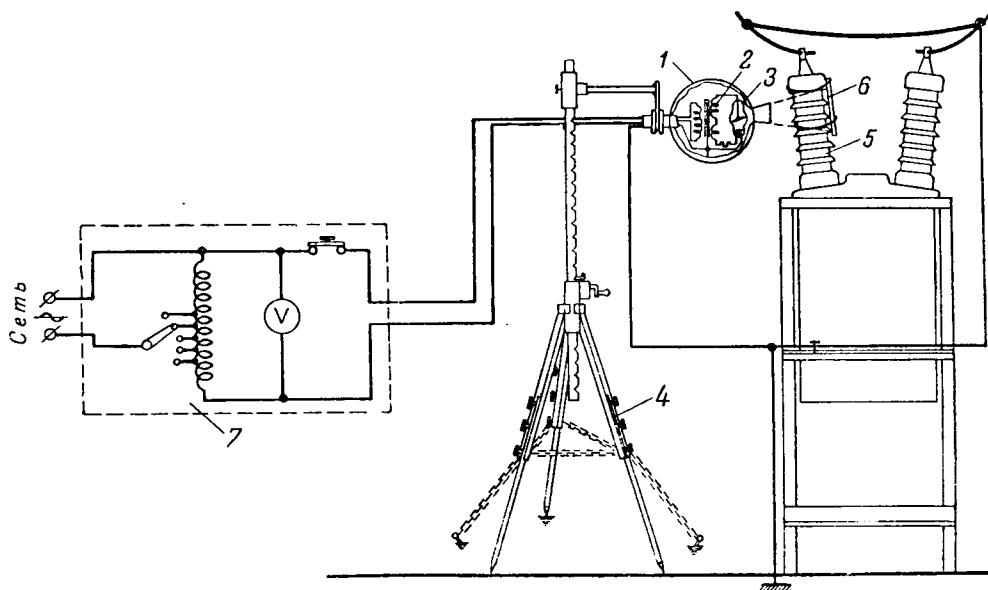


Рис. 3. Схема рентгеновского просвечивания изолятора ВМ-35-Н.

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 перезаливке.

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:

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

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:

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

#### Литература

1. И. А. Сыромятников. Вопросы эксплуатации электрической изоляции и требования к поставляемой изоляции. Электричество, № 2, 1949.

2. А. И. Долгинов. Профилактические испытания высоковольтных изоляторов. Эл. станции, № 10, 1949.

3. В. Л. Солодюк и Н. Г. Соловьев. Восстановление мастиконаполненных вводов. Эл. станции, № 1, 1949.

4. И. К. Федченко. Импульсная прочность стеклянных конденсаторов на рабочее напряжение 3,6 и 10 кВ. 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 электрической энергии на большие расстояния находят применение различные устройства для продольной компенсации параметров крепления. В аварийных случаях наличие этих устройств может иметь любой вид нарушения последовательной симметрии трехфазной цепи.

Существующие в настоящее время методы расчета сложных несимметрических режимов электрических систем разработаны только для однотипных коротких замыканий и частных случаев последовательной несимметрии (например, разрывы фаз и т. п.). Ниже рассматривается эмпирический метод расчета, пригодный для этого вида последовательной несимметрии и извьольной схемы сети. Этот метод позволяет решить задачу в каждом отдельном случае при помощи неизменных простейших уравнений, параметры которых определяются по предлагаемым правилам на основании схем отдельных последовательностей. Такой путь решения не требует изложения схемы замещения.

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

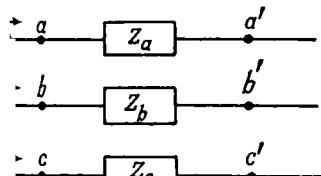


Рис. 1.

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

$$\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 3\dot{E} \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

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

$$I_a = 3K'_z \begin{vmatrix} 0(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ \dot{E}a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) \\ 0a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) \end{vmatrix}, \quad I_b = 3K'_z \begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)0(Z_{L0} + Z_c) \\ (Z_{L1} + Z_a)\dot{E}a^2(Z_{L1} + Z_c) \\ (Z_{L2} + Z_a)0a(Z_{L2} + Z_c) \end{vmatrix}, \quad (5)$$

$$I_c = 3K'_z \begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)0 \\ (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)\dot{E} \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)0 \end{vmatrix},$$

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

Дан в общем виде метод определения токов и напряжений при несимметрическом 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 несимметрическую систему падений напряжения на участках цепи  $aa'$ ;  $bb'$ ;  $cc'$  на симметрические составляющие:

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_{L0} \\ \dot{U}_{L1} \\ \dot{U}_{L2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & aa^2 & \\ 1 & a^2a & \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_a Z_a \\ I_b Z_b \\ I_c Z_c \end{vmatrix}. \quad (1)$$

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

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

Разложим на симметрические составляющие также и несимметрическую систему токов  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ :

$$\begin{vmatrix} I_{L0} \\ I_{L1} \\ I_{L2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix}. \quad (3)$$

$$\begin{vmatrix} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ (Z_{L1} + Z_a)a(Z_{L1} + Z_b)a^2(Z_{L1} + Z_c) \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 3\dot{E} \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

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

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

$$I_{L2} = \dot{E} K'_z \begin{vmatrix} (Z_0 + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ 1 & a^2 & a \\ (Z_{L2} + Z_a)a^2(Z_{L2} + Z_b)a(Z_{L2} + Z_c) \end{vmatrix}$$

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:

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

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

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  $Z_{L2}$  на  $Z_{L2} + Z$ . 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:

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

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

$$\begin{vmatrix} -U_{K0} \\ -U_{L0} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{K0} Z_{LK0} \\ Z_{LK0} Z_{L0} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{K0} \\ I_{L0} \end{vmatrix}.$$

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

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

где

$$\begin{vmatrix} \dot{E}_{3K} \\ \dot{E}_{3L} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{K1} Z_{LK1} \\ Z_{LK1} Z_{L1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{3K} \\ I_{3L} \end{vmatrix}. \quad (9)$$

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

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

Уравнения (10) назовем расчетными уравнениями формы  $Z$ . Коэффициенты уравнений (10) в самом общем случае определяются через параметры схем отдельных последовательностей и 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:

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

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

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

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

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

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

$$Z_{11} = Z_{K1} + K'_Z Z_{LK1}^2 \left| \begin{array}{cc} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ -1 \quad -a \\ (Z_{L2} + Z_a) a^2 (Z_{L2} + Z_b) a (Z_{L2} + Z_c) \end{array} \right|$$

$$Z_{30} = K'_Z Z_{LK2} Z_{LK0} \left| \begin{array}{cc} -1 \quad -a^2 \\ (Z_{L1} + Z_a) a (Z_{L1} + Z_b) a^2 (Z_{L1} + Z_c) \\ (Z_{L2} + Z_a) a^2 (Z_{L2} + Z_b) a (Z_{L2} + Z_c) \end{array} \right|$$

$$Z_{20} = Z_{K2} + K'_Z Z_{LK2}^2 \left| \begin{array}{cc} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ (Z_{L1} + Z_a) a (Z_{L1} + Z_b) a^2 (Z_{L1} + Z_c) \\ -1 \quad -a^2 \end{array} \right|$$

$$Z_{00} = Z_{K0} + K'_Z Z_{LK0}^2 \left| \begin{array}{cc} -1 \quad -1 \\ (Z_{L1} + Z_a) a (Z_{L1} + Z_b) a^2 (Z_{L1} + Z_c) \\ (Z_{L2} + Z_a) a^2 (Z_{L2} + Z_b) a (Z_{L2} + Z_c) \end{array} \right|$$

$$Z_{13} = K'_Z Z_{LK1} Z_{LK2} \left| \begin{array}{cc} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ (Z_{L1} + Z_a) a (Z_{L1} + Z_b) a^2 (Z_{L1} + Z_c) \\ -1 \quad -a \end{array} \right|$$

$$Z_{10} = K'_Z Z_{LK1} Z_{LK0} \left| \begin{array}{cc} -1 \quad -a \quad -a^2 \\ (Z_{L1} + Z_a) a (Z_{L1} + Z_b) a^2 (Z_{L1} + Z_c) \\ (Z_{L2} + Z_a) a^2 (Z_{L2} + Z_b) a (Z_{L2} + Z_c) \end{array} \right|$$

$$Z_{21} = K'_Z Z_{LK1} \left| \begin{array}{cc} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ -1 \quad -a \quad -a^2 \\ (Z_{L2} + Z_a) a^2 (Z_{L2} + Z_b) a (Z_{L2} + Z_c) \end{array} \right|$$

$$S_{20} = K'_Z Z_{LK0} \left| \begin{array}{cc} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ -1 \quad -1 \quad -1 \\ (Z_{L2} + Z_a) a^2 (Z_{L2} + Z_b) a (Z_{L2} + Z_c) \end{array} \right|$$

$$K'_Z = \frac{1}{\left| \begin{array}{c} (Z_{L0} + Z_a)(Z_{L0} + Z_b)(Z_{L0} + Z_c) \\ (Z_{L1} + Z_a) a (Z_{L1} + Z_b) a^2 (Z_{L1} + Z_c) \\ (Z_{L2} + Z_a) a^2 (Z_{L2} + Z_b) a (Z_{L2} + Z_c) \end{array} \right|}$$

Выразим уравнения схемы каждой последовательности через собственные и взаимные проводимости:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \dot{I}_{K1} - \dot{I}_{3K} \\ \dot{I}_{L1} - \dot{I}_{3L} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} Y_{K1} - Y_{LK1} \\ -Y_{LK1} Y_L \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{E} - U_{K1} \\ -U_{L1} \end{vmatrix}, \\ \begin{vmatrix} \dot{I}_{K2} \\ \dot{I}_{L2} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} Y_{K2} - Y_{LK2} \\ -Y_{LK2} Y_L \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -U_{K2} \\ -U_{LK2} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} \dot{I}_{K0} \\ \dot{I}_{L0} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} Y_{K0} - Y_{LK0} \\ -Y_{LK0} Y_L \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -U_{K0} \\ -U_{L0} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

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

$Z_{aa}$  на  $Y_{aa}$ ,  $Z_{a3}$  на  $-Y_{a3}$ ,  $S_{Za}$  на  $S_{Y_a}$ ,  $Z_\delta$  на  $Y_\delta$ ,  $Z_{L2}$  на  $Y_{L2}$ ,  $Z_{LK2}$  на  $Y_{LK2}$ ,  $Z_{Ka}$  на  $Y_{Ka}$ ,  $K_z$  на  $K_y$ .

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

$$\begin{aligned} Y_{aa} &= Y_{Ka} - K_y Y_{LK2}^2, \\ Y_{a3} &= K_y Y_{LK2} Y_{LK3}, \\ S_{Y_a} &= -K_y Y_{LK2}, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$K_y = \frac{1}{Y_{L1} + Y_{L2} + Y_{L0} + 3Y_a}.$$

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

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  $Z_{L2}$  на  $Z_{L2} + Z$ , а также придать им форму  $Y$  путем соответствующей замены. В таком виде уравнения (11) можно использовать также при  $Y_a = 0$  и  $Y_b = Y_c = Y$ , заменив  $Y_a$  на  $-Y$  и  $Y_{L2}$  на  $Y_{L2} + Y$ , 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:

$$\begin{vmatrix} \dot{E}_{II} - U_{K1} \\ \dot{E}_{II} - \dot{E}_I - \dot{U}_{L1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{III} Z_{II1} \\ Z_{III} Z_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{I}_{K1} \\ \dot{I}_{L1} \end{vmatrix}. \quad (I,1)$$

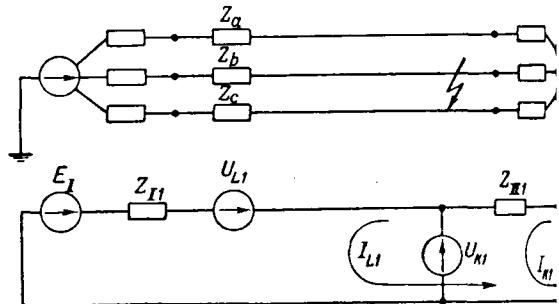


Рис. 2.

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

$$Z_{K1} = Z_{LK1} = Z_{III}; Z_{L1} = Z_i = Z_{II} + Z_{III}.$$

Уравнения (10) в данном случае дают систему:

$$\begin{aligned} \dot{E} - \dot{U}_{K1} + \dot{E}_{3L} S_{Z1} &= Z_{11} \dot{I}_{K1} + Z_{12} \dot{I}_{K2}; \\ -\dot{U}_{K2} + \dot{E}_{3L} S_{Z2} &= Z_{21} \dot{I}_{K1} + Z_{22} \dot{I}_{K2} \end{aligned}$$

Используя граничные условия, получим:

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

Подставляя значение параметров согласно уравнениям окончательно имеем:

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

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

**Приложение II. Условные обозначения, принятые в статье:**  $a, b, c$  — любые из чисел ряда  $0, 1, 2; i = 1, 2$  — индекс последовательности фаз;  $\delta$  — любая из  $a, b, c$ , обозначающих фазы;  $\dot{U}_{Li}$ ;  $\dot{I}_{Li}$  — симметричные ставляющие напряжения и тока, вызванные наличием последовательной несимметрии;  $\dot{U}_{Ki}$ ,  $\dot{I}_{Ki}$  — симметричные составляющие напряжения и тока короткого замыкания;  $Y_{Li}$ ,  $Y_{LKi}$ ,  $Y_{Ki}$ ,  $Z_{Li}$ ,  $Z_{LKi}$ ,  $Z_{Ki}$  — параметры схем отдельных последовательностей;  $Z_{aa}$ ,  $Z_{a3}$ ,  $S_{Za}$ ,  $Y_{az}$ ,  $Y_{af}$ ,  $S_{Y_a}$  — параметры расчетных уравнений;  $Z_\delta = \frac{1}{Y_\delta}$  — параметры определяющие последовательную несимметрию.

### Литература

1. Н. Н. Шедрин. К теории сложных несимметрических режимов электрических систем. Электричество, № 5, 1948.

2. П. Л. Калатаров. К теории пассивного шестиполюсника. Труды ЛПИ, № 2, 1947.

3. Г. Т. Адонц. К теории сложных несимметрических режимов электрических систем. Электричество, № 9, 1948.

# Метод получения основной кривой намагничивания

Инж. Г. С. ВЕКСЛЕР

Киев

Получение основной кривой намагничивания связано с такими ошибками, как снятие первоначальной статической кривой,

и как эти кривые весьма близки друг к другу [1, 2], то для характеристики ферромагнитиков 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, 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 отсчета индукции  $\Delta B$ , производимого при баллистическом способе измерения по баллистическому гальванометру, отсчетом перемещения электронного луча в вертикальном направлении экране осциллографа. Таким образом, кривую изображали снимать по отдельным точкам, с объективной документацией и также медлен-

Описан метод получения основной кривой намагничивания и «гнезд гистерезистных петель» на экране электроннолучевой трубы, позволяющий быстро получить объективную документацию в виде фотографии и значительно упростить и ускорить магнитные измерения при испытании магнитных материалов.

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

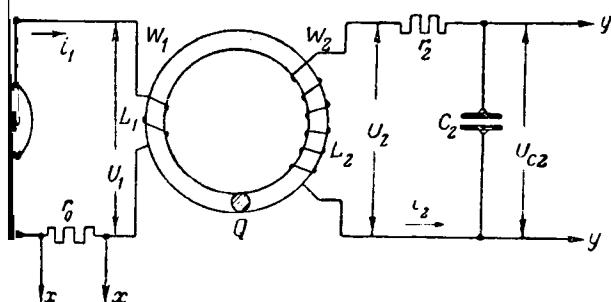


Рис. 1. Схема установки.

— к горизонтальным пластинам осциллографа;  $y$  — к вертикальным пластинам осциллографа.

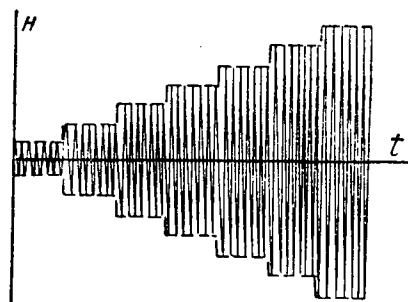


Рис. 2. Рабочий пакет напряженности магнитного поля.

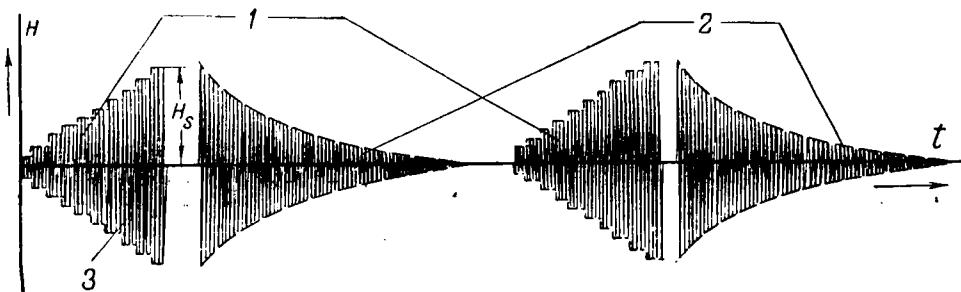


Рис. 3. Пакеты напряженности магнитного поля.  
1—рабочие пакеты; 2—размагничивающие пакеты; 3—колебания заполнения пакета.

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 достаточноного числа частных циклов на экране будет отчетливо видна кривая, образованная отдельными вершинами петель. Особенно отчетливо основная динамическая кривая будет видна на экране электронно-лучевой трубы 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 вращения 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 цепи в канале индукции.

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

Если предельная петля в исследуемом диапазоне частот не будет изменять своей ширины, 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 измерений исключаются субъективные ошибки, так как кривые можно фотографировать.

Если вместо рабочего пакета колебаний подать на образец импульс с максимальным значением напряженности магнитного поля  $H_{max}$  за время прохождения переднего фронта импульса при изменении значения  $H$  от нуля до  $H_{max}$  на экране осциллографа будет видна первоначальная кривая намагничивания. Чем более тупой 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 относительно погрешностью прибора (порядка 3%).

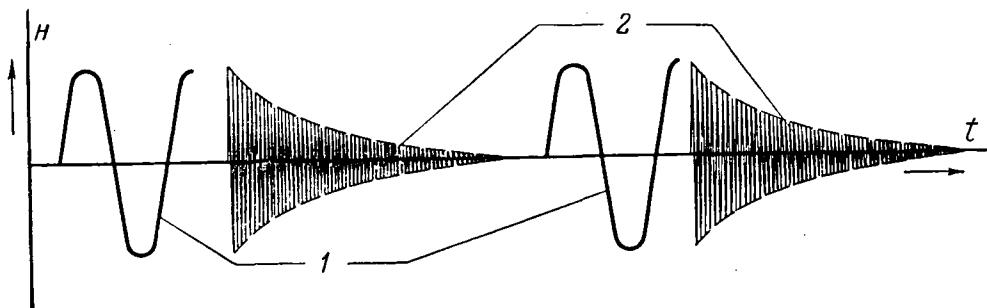


Рис. 4. Напряженность магнитного поля.  
1—рабочая напряженность поля; 2—размагничивающие пакеты.

Экспериментальная установка. Схема опытной новки приведена на рис. 5. Между главным и преобразователя 1 (он же двигатель) и коммутатором 3 было установлено общее даточное отношение 80 : 1. При двух парах хов преобразователя 1 за каждый оборот коммутатора совершалось 160 заполняющих баний, которые генерировал преобразователь 1. Каждая ступенька огибающей рабочего тока была образована при помощи четырех сопротивлений, замкнутых накоротко, контактов 80-ти контактного коммутатора 3; таким образом, для этого приспособления было отведено 8 контактов с неизменной амплитудой. Всего было тупенек, на что было выделено 40 контактов коммутатора. Желательная амплитуда заполняющих колебаний в пределах одной ступеньки навивалась при помощи одного из линейных потенциометров 6. Для этой цели было занято 0 потенциометров.

Генератор 2 создавал колебания с частотой, в раза меньшей, нежели преобразователь 1. при питании от генератора 2 потенциометров 6 в этом рабочем пакете помещалось только 4 заполняющих колебания, из которых каждое имело в больший период, чем при питании от преобразователя 1.

Как как генератор и преобразователь не обладали достаточной мощностью, то генерируемые колебания поступали в усилитель 8.

Размагничивание осуществлялось колебаниями, развиваемыми преобразователем 1, который и группу линейных потенциометров 7. Для размагничивания были использованы 14 потенциометров; каждый давал напряжение на два замкнутых друг с другом соседних контакта комму-

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

Чередование процессов, полученное при помощи коммутатора 3 и примененное для получения динамической кривой намагничивания, приведено на рис. 6. Для возможности получения рабочего пакета, начинающегося с наибольшего значения напряженности магнитного поля, 80-й контакт соединяется не непосредственно с землей, а через сопротивление  $r=5$  ком. Это предохраняет, 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 размагничивающий пакет также начинался колебаниями с большой амплитудой.

Эксцентрик 4, насаженный непосредственно на вал коммутатора 3, осуществлял короткое замыкание 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 результаты. Частные магнитные петли стальной отожженной проволоки диаметром 0,5 мм, соответствующие 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 измерении данного образца в диапазоне частот до 160 гц не было обнаружено расширения предель-

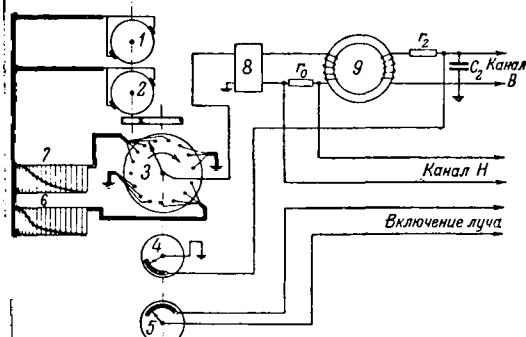


Рис. 5. Схема экспериментальной установки.

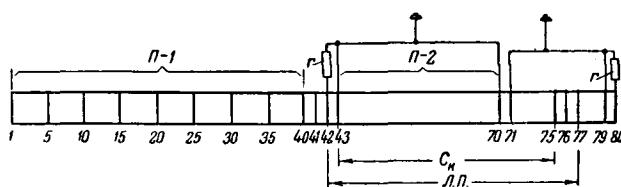


Рис. 6. Чередование процессов коммутатором.  
П-1 и П-2 потенциометры; Л.П. — луч погашен;  $r=5$  ком.  
 $C_k$  — конденсатор  $C_2$  замкнут накоротко.

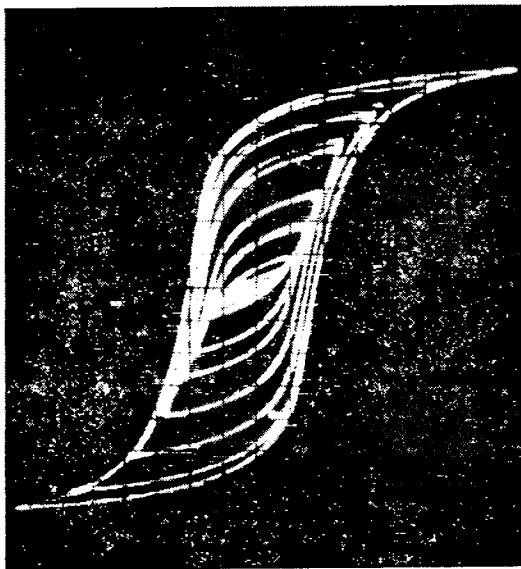


Рис. 7. Семейство магнитных петель для стальной проволоки.

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  $H_s$ ,  $H_s$ ,  $B_s$  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 намагничающим полем при частоте 160 Гц на сердечник, свитый из пермаллоевой полоски. 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 размагничающий 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 на образец в нем остается индукция (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 намагничающего поля, изменяющегося так, что это показано на рис. 9, при этом 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 воздействии, 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, подлежащих 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 пробована вместо ступенчатой огибающей линейная огибающая. Для этого вместо коммутатора и функциональных потенциометров был применен один линейный потенциометр, выполненный из тонкой проволоки, свитой в спираль, насыженной на обод диска. Движок потенциометра, скользящий по ободу диска, был закреплен на валу коммутатора и при его вращении

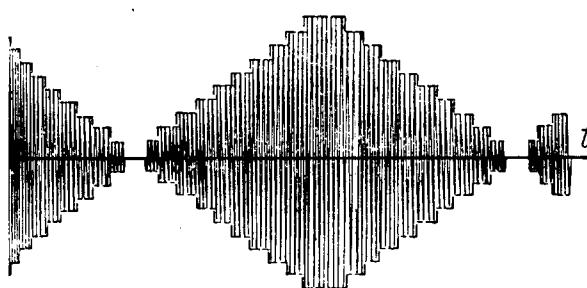


Рис. 9. Пакеты напряженностей магнитного поля.

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

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

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

Подробный анализ погрешностей измерений, связанных с выбором параметров схемы, проверен экспериментально, привел к следующим выводам.

1. При  $\frac{i_1 w_1}{i_1 w_1} \leq 0,001$  [Л. 8] реакция вторичной



Рис. 10. Основная кривая и предельная магнитная петля.

цепи практически не оказывается 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 индуктивностях рассеяния и пренебрежимо малой нагрузке интегрирующей цепи. Здесь  $f_n$  — наименее 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 мкм, 2) диаметр светящейся точки на экране равен 1,5 мкм, 3) точность отсчета величины отклонения луча на экране — 0,75 мкм, 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:

$$B_m = \frac{U_f \cdot 10^8}{4k_u f w_2 Q}, \quad (1)$$

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

$k_u$  — коэффициент формы кривой напряжения сети;

$f$  — частота сети — 50 гц;

$w_2$  — число витков измерительной катушки;

$Q$  — поперечное сечение ферромагнитика,  $\text{см}^2$ .

Считая, что при определении отдельных величин возможны следующие относительные ошибки:  $U_f = 1\%$ ;  $Q = 0,4\%$ ;  $f = 1\%$ ;  $k_u = 2\%$  (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  $U_f$  на канал  $B$ , замечая при этом отклонения луча по вертикали  $y_f$ . Тогда максимальное значение индукции, приводящее к полученному отклонению луча, будет:

$$|B_m| = \frac{C_2 r_2 U_f \cdot 10^8}{w_2 Q}. \quad (2)$$

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

$$H_m = \frac{0,4\pi w_1 U_f}{r_0 l_{cp}}.$$

Принимая следующие величины относительных наибольших ошибок при определении отдельных величин:  $U_f = 1\%$ ;  $C_2 = 1\%$ ;  $r_2 = 1\%$ ;  $Q = 0,4\%$ ;  $r_0 = 1\%$ ;  $l_{cp} = 0,2\%$ ;  $x_f$  и  $y_f$  — 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 былчен при проведении ряда контрольных изме-

**Выводы.** Метод получения основной мической кривой намагничивания, основанный на наблюдении всего нестационарного матча процесса намагничивания в координатах  $B$ , дает возможность получить на экране осциллографа (за 2...3 сек) одновременно генетических петель и основную динамическую кривую намагничивания. Метод позволяет подать объективную документацию в виде фотографии. Для сравнительно тонких образцов ферромагнитика могут применяться разные частоты звукового импульса. При испытании более толстых образцов следует применять более низкие частоты. Образцы, имеющие заметные потери на вихревые токи по сравнению с потерями на гистерезисе, даже на низких частотах, измерению не поддаются. Возможность одновременного получения основной 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 рисунке представлена эквивалентная схема измерительной цепи канала индукции  $B$ .

Коэффициент передачи такой схемы может быть представлен в следующем виде:

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

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

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

$$|k(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{r_2}{r_y} - \omega^2 LC_2\right)^2 + \omega^2 r_2^2 C_2^2}}. \quad (5)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{\omega r_2 C_2}{1 + \frac{r_2}{r_y} - \omega^2 LC_2}. \quad (6)$$

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

$L$  — коэффициент самондукции 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  $r_y$ .

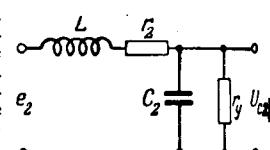


Рис. 11. Эквивалентная схема.

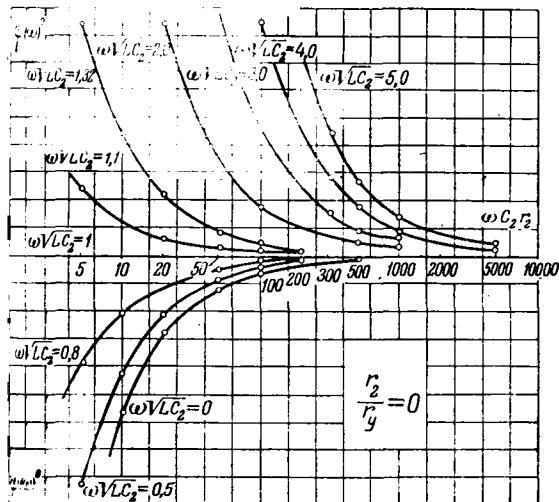


Рис. 12.

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

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

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

На рис. 12 дано семейство кривых  $\phi(\omega)$  в зависимости от  $\omega C_2 r_2$  при разных  $\omega VLC_2$ . Семейство построено для одного из значений  $\frac{r_2}{r_y} = 0$ . С осью абсцисс совпадает

одна кривая, для которой  $\phi(\omega) = 0$ .

На рис. 13 приведена кривая  $|k(\omega)|$  для разных значений  $\omega r_2 C_2$  и  $\omega VLC_2$  при  $\frac{r_2}{r_y} = 0$ . В пределах углов фазной ошибки до  $5^\circ$  значение  $\omega r_2 C_2$  порядка 20 и поэтому, в пределах, пересекающих нас, выражение (I,3) переходит

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

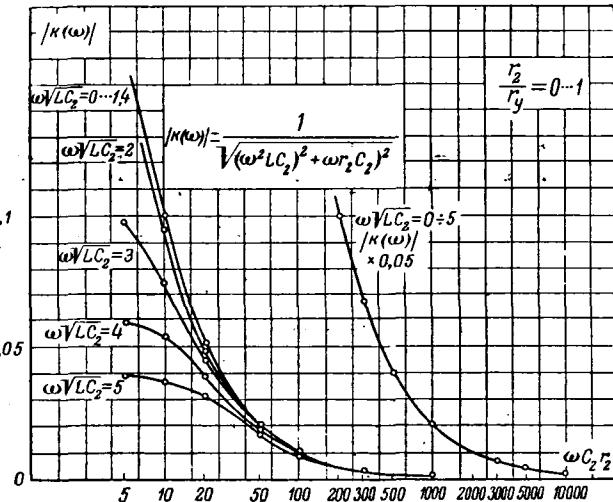


Рис. 13.

Максимальная ошибка при этом допущении будет, когда  $\omega VLC_2 = 5$  и  $\frac{r_2}{r_y} = 1$  и составляет около 5%. Имея в виду, 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. Электрические 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. В. Е. 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 разнообразия 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,

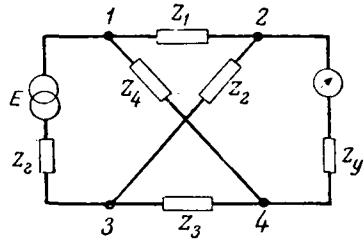


Рис. 1. X-образный (скрещенный) мост.

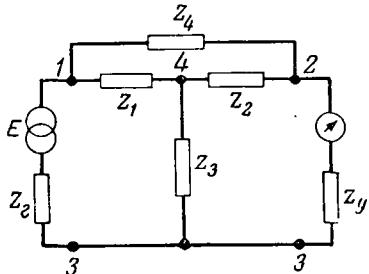


Рис. 2. Т-образный мост.

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  $Z_z$  [Л. 3].

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: X-образные (скрещенные) и Т-образные (рис. 1 и 2).

Если прибор (указатель), который используется для регистрации момента равновесия схемы, 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 цепями генератора и указателя. В моменте равновесия:

$$Z_{zy} = \frac{\beta}{\alpha} = \infty.$$

Воспользовавшись [Л. 4] коэффициентами обеих матриц  $D$  указанных выше четырехполюсников (рис. 1 и 2), не представляет труда показать, что  $\alpha$  и  $\beta$  (1) будут иметь значения, приведенные в табл. 1.

Табл. 1

Тип мостов	Т-образные мосты	X-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:

$$\gamma = [Z_z + (Z_{zz})_\infty] [Z_y + Z_{yy}],$$

где  $(Z_{zz})_\infty$  — 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]:

$$Z_{zz} = \frac{D_{12} + D_{21}Z_y}{D_{22} + D_{11}Z_y},$$

$$Z_{yy} = \frac{D_{12} + D_{21}Z_z}{D_{11} + D_{22}Z_z},$$

$$Z_{zy} = D_{12} + D_{21}Z_z Z_y + D_{11}Z_y + D_{22}Z_z = D_{21}\gamma.$$

В соответствии с определением [Л. 2, 3], дуда уравнению (2) и принимая также во внимание, что  $\beta \neq \infty$ , можно показать, что при равенстве моста

$$\alpha = 0. \quad (2a)$$

В комплексной плоскости<sup>1</sup>:

$$(\alpha)_\delta = 0; \quad (\alpha)_{\omega} = 0. \quad (2b)$$

Выражение (2b) удовлетворяется при изменении по крайней мере двух параметров электрических цепей мостовой схемы.

Условие равновесия мостовой схемы (2a) не иссит от перемены местами генератора и ука-  
зателя. Однако при этом происходит изменение  
дных сопротивлений четырехполюсника (3),  
который может иметь существенное значение для  
какой согласования работы установки. В даль-  
шем ограничимся рассмотрением наивысших,  
известно, наибольшее распространение X-об-  
разных мостов, приводя их к четырехплечному  
четырехузловому виду.

Приведение сложных мостовых схем к четы-  
рехплечному и четырехузловому виду не пред-  
ставляет затруднений при использовании обще-  
применимых формул эквивалентных преобразований,  
как и в том частном случае, когда отдельные  
участки моста имеют индуктивную связь.

Рассмотрим плечи моста по их назначению.  
Плечо  $Z_x$  обычно содержит неизвестные па-  
раметры, а остальные три плеча составлены из  
известных элементов. Заметим, что эти „образ-  
ные“ плечи имеют различную значимость как  
после достижения момента равновесия моста,  
и в конструктивном оформлении установки.  
Из образцовых элементов моста будем  
выбирать „основным образцом“  $Z_0$ , выбирая его  
параметры соответственно параметрам измеряемого  
объекта  $Z_x$ . Основной образец  $Z_0$  является на-  
иболее хорошо изученным в отношении влияния  
различных внешних факторов и часто используется  
как плавно переменный элемент, необходимый  
достижении состояния равновесия моста.  
Остальные образцовые элементы моста  $Z_\delta$ ,  
или  $Z_{\delta+2}$  назовем элементами „диапазона“.  
Обычно выполняются в виде постоянных или  
изменяющихся ступенями сопротивлений. При  
использовании рассчитанной мостовой схеме элементы  
„диапазона“ могут сохраняться постоянными в  
ограниченных пределах изменения измеряемой величины  $Z_x$ . Активное сопротивление  $R_x$  неизвестно  
плеча  $Z_x$  во многих случаях принимают  
за омическое и измеряют только на посто-  
янном токе. Исключение составляют цепи с кон-  
денсаторами, омическое сопротивление которых  
достаточно трудно измерить на постоянном токе.  
Тому здесь, на переменном токе, появляется  
важнейший объект измерения — „угол по-  
тока“. В дальнейшем, рассматривая мосты пере-  
менного тока и имея в виду назначение схемы,

<sup>1</sup> Индексом  $\delta$  обозначена действительная часть, ин-  
дексом  $\omega$  — мнимая.

будем выделять и называть „основным“ тот из  
параметров  $L$ ,  $M$ ,  $C$ , который является объектом  
измерения.

**Классификация мостовых схем.** Как изве-  
стно [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 — образ-  
цовый и измеряемый элементы, находятся в смеж-  
ных плечах. Для расчетов имеет значение отно-  
шение полных сопротивлений элементов диапазона:

$$\frac{Z_{\delta+1}}{Z_\delta} = A + jB = \left| \frac{Z_{\delta+1}}{Z_\delta} \right| e^{j[\varphi_{\delta+1} - \varphi_\delta]} = \left| \frac{Z_{\delta+1}}{Z_\delta} \right| e^{j\varphi_{\delta+1}}.$$

Соответственно во второй группе мостов про-  
изведения образцовый и измеряемый элементы  
находятся в противолежащих плечах.

Здесь следует знать:

$$Z_\delta Z_{\delta+2} = \Gamma + j\Delta = |Z_\delta Z_{\delta+2}| e^{j[\varphi_\delta + \varphi_{\delta+2}]} = \\ = |Z_\delta Z_{\delta+2}| e^{j\lambda_\delta}.$$

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  
могут разбить на 10 основных групп, как это  
указано в табл. 2 и 3. В таблицах приведены  
основные расчетные зависимости между парамет-  
рами моста.

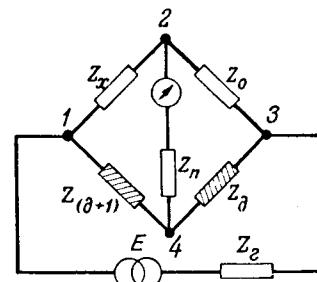


Рис. 3. X-образный мост отношения.

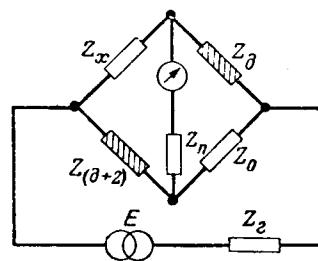
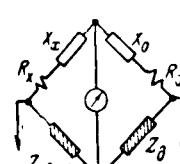
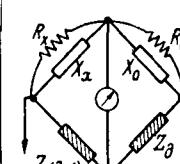
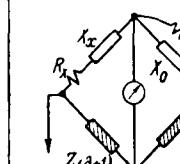
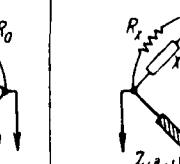
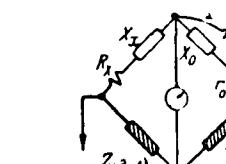


Рис. 4. X-образный мост произведения.

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.

Таблица 2

Способ соединения $Z_x$ и $Z_\theta$		Одинарный способ соединения $Z_\theta$ и $Z_x$		Различный способ соединения $Z_\theta$ и $Z_x$		
Вид плеч "отношения"	Вид мосто- вой схемы	<i>a</i> последовательное последовательное	<i>b</i> параллельное параллельное	<i>c</i> последовательное параллельное	<i>d</i> параллельное последовательное	<i>e</i> последовательно-параллельное
$\frac{Z_{\theta+1}}{Z_\theta}$						
$A + jB = \sqrt{A^2 + B^2} e^{j\theta_0}$	$\frac{R_x}{R_0}$	$A\theta_R$	$\frac{A}{\theta_R \cos^2 \theta_0}$	$A\theta_R \cos^2 \theta_0$	$\frac{A}{\theta_R \cos^2 \theta_0 \cos^2 \theta_\theta}$	$\frac{A\theta_R \cos^2 \theta_0}{1 + \cos^2 \delta(r_0, x_0) \frac{\operatorname{tg} \delta(r_0, x_0)}{\operatorname{tg} \delta(R_0    x_0)}}$
$\theta_\theta = \varphi_{\theta+1} - \varphi_\theta$	$\frac{X_x}{X_0}$	$A\theta_X$	$\frac{A}{\theta_X \cos^2 \theta_0}$	$A\theta_X \sin^2 \theta_0$	$\frac{A}{\theta_X \sin^2 \theta_0 \cos^2 \theta_\theta}$	$\frac{A\theta_X \sin^2 \theta_0}{\cos^2 \delta(r_0, x_0)}$
$A + j0 = Ae^{j0}$	$\frac{R_x}{R_0}$	$A$	$A$	$A \cos^2 \theta_0$	$\frac{A}{\cos^2 \theta_0}$	$\frac{A \cos^2 \theta_0}{1 + \cos^2 \delta(r_0, x_0) \frac{\operatorname{tg} \delta(r_0, x_0)}{\operatorname{tg} \delta(R_0    x_0)}}$
$\theta_\theta = 0$	$\frac{X_x}{X_0}$	$A$	$A$	$A \sin^2 \theta_0$	$\frac{A}{\sin^2 \theta_0}$	$\frac{A \sin^2 \theta_0}{\cos^2 \delta(r_0, x_0)}$

вид плоскости "произведения"		$\alpha$ последовательное последовательное		$\delta$ параллельное последовательное		$\theta^2$ параллельное последовательное		$\theta$ последовательное последовательно-параллельное	
		$Z_\partial Z_\partial + 2$	$Z_\partial$	$Z_\partial$	$Z_\partial$	$Z_\partial Z_\partial + 2$	$Z_\partial$	$Z_\partial$	$Z_\partial$
$\lambda_\partial = \varphi_\partial + \varphi_0$	$R_x R_0$	$\Gamma \theta_R \cos^3 \varphi_0$	$\Gamma \theta_R$	$\frac{\Gamma}{\theta_R \cos^2 \varphi_0 \cos^2 \lambda_\partial}$	$\frac{\Gamma}{\theta_R \cos^2 \lambda_\partial}$	$\frac{\Gamma}{\theta_x \sin^2 \varphi_0}$	$\frac{\Gamma}{\theta_x \cos^2 \lambda_\partial}$	$\frac{\Gamma}{1 + \cos^2 \delta(r_0, x_0) \frac{\operatorname{tg} \delta(r_0, x_0)}{\operatorname{tg} \delta(R_0    x_0)}}$	$\frac{\Gamma}{\sin^2 \varphi_0}$
$\Gamma + j\Delta = \sqrt{\Gamma^2 + \Delta^2} e^{j\lambda_\partial}$	$X_x X_0$	$R_x R_0$	$\Gamma \theta_x \sin^2 \varphi_0$	$\Gamma \theta_x$	$\frac{\Gamma}{\theta_x \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \lambda_\partial}$	$R_x R_0$	$\Gamma \cos^3 \varphi_0$	$\Gamma$	$\Gamma$
$\lambda_\partial = \varphi_\partial + \varphi_0$	$X_x X_0$	$\Gamma \cos^3 \varphi_0$	$R_x R_0$	$\frac{\Gamma}{\cos^2 \varphi_0}$	$\frac{\Gamma}{\cos^2 \varphi_0}$	$X_x X_0$	$\Gamma \sin^2 \varphi_0$	$\frac{\Gamma}{\operatorname{tg} \delta(r_0, x_0) \frac{\operatorname{tg} \delta(r_0, x_0)}{\operatorname{tg} \delta(R_0    x_0)}}$	$\Gamma \cos^2 \delta(r_0, x_0)$

Для сокращения записей в табл. 2 и 3 обозначено:

Символ Мост	$\nu_R$	$\nu_x$
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  $r_0, x_0$ ;  $\delta(R_0 \parallel X_0)$  — 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

$$\frac{R_x}{R_0} = A\nu_1(Z) \text{ и } \frac{X_x}{X_0} = A\nu_2(Z); \quad (4)$$

мосты произведения

$$R_x R_0 = \Gamma \psi_1(Z); \quad X_x X_0 = \Gamma \psi_2(Z), \quad (5)$$

где  $\nu_i(Z)$  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) перепишутся:

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{R_x}{R_0} \right) \cdot \frac{1}{A} &= \nu_1(Z), \\ \left( \frac{W_x}{W_0} \right) \frac{1}{A} &= \nu_2(Z) \text{ при } Z_x = \omega W_x, \\ \left( \frac{W_x}{W_0} \right) A &= \frac{1}{\psi_2(Z)} \text{ при } Z_x = \frac{1}{\omega W_x}; \end{aligned} \right\} \quad (4a)$$

$$\left. \begin{aligned} (R_x R_0) \frac{1}{\Gamma} &= \psi_1(Z), \\ \left( W_x \frac{1}{W_0} \right) \frac{1}{\Gamma} &= \psi_2(Z) \text{ при } Z_x = \omega W_x, \\ \left( W_x \frac{1}{W_0} \right) \Gamma &= \frac{1}{\psi_2(Z)} \text{ при } Z_x = \frac{1}{\omega W_x}. \end{aligned} \right\} \quad (5a)$$

Заметим, что правые части уравнений (4a) и (5a) могут быть преобразованы к виду

$$\nu_i(Z) = 1 \pm \sigma_i; \quad \psi_i(Z) = 1 \pm \tau_i,$$

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 ~~для~~ будем разделять их по системам.

Наименование системы определяется основного измеряемого параметра  $W_x$ , сопротивления  $Z_x$  и видом основного образца параметра  $W_0$ , сопротивления  $Z_0$ .

В табл. 4 предлагаются наименования мостов.

В пределах одной и той же „системы“ находятся различные мостовые схемы, отличающиеся друг от друга элементами диапазона. Поэтому каждому виду такой схемы дополнительно присваивается особое условное обозначение, учитывающее вид элементов диапазона.

Для установления системы условных обозначений мостовых схем воспользуемся частями (4a) и (5a). Тогда мосты отношения (рис. 3) будем условно обозначать в виде  $\nu$ . Числитель отношения указывает на основной величины, подлежащей измерению. Знаменатель определяет выбранную основную разцовую величину. Все выражение помещают скобку и умножается на новую „дробь“, подобным образом определяющую вид элементов диапазона.

Мосты произведения (рис. 4) будем условно обозначать в виде произведения  $\Gamma$ . 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, вновь умножается на произведение, указывающее вид элементов диапазона.

Заметим, что числитель и знаменатель условного обозначения моста отношения состоят из параметров электрических цепей, образующих реактивные сопротивления одного знака.

Сомножители условного обозначения моста произведения состоят из параметров электрических цепей, образующих реактивные сопротивления разных знаков.

Все отмеченное дает возможность сразу определить вид моста и его расчетную форму, 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 (последование и 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

Наименование системы	Вид основных параметров моста $W_x$ и $W_0$	Условное обозначение моста данной системы
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 $L_0, C_0$	$\left(\frac{\omega L}{\frac{1}{\omega C}}\right) \left(\frac{1}{R}\right)^0$ или $\left(\frac{1}{\omega L}\right) \left(\frac{1}{R}\right)^0$
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 $M_0$	$\left(\frac{M}{M}\right) \frac{1}{R}$ ; $\left(\frac{L}{M}\right) \frac{1}{R}$
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  $R$  или  $C_n$ ,  $R_n$ , если эти параметры переменны). Параллельное соединение обозначается соответствующими 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, необразуя ее в эквивалентную четырехплечую и трехузловую. Попрежнему обозначаем: 1, 2 — узловые точки моста I, II, III, IV — плечи моста, считая, что между узлами 1, 3 всегда очарется генератор, между узлами 2, 4 — узлы, цепи которых дополнительно обозначим: V, VI.

В тех случаях, когда схема является сложной, являются дополнительные узлы, а в условном значении указываются цифры со штрихом. Например, узлы 3 и 3' показывают, что между четырехплечной мостовой схемой (1, 2, 3, 4) находится 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 уравновешивания 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

$$K_n = \lg \frac{\epsilon}{\epsilon_0},$$

где  $\epsilon$  — наибольшая погрешность определения действительных значений образцовых элементов данного моста;  $\epsilon_0$  — то же, но при наилучшем изготовлении и поверке их по высшему классу точности.

Отсюда для мостов высшего класса точности будет:

$$K_n = \lg 1 = 0.$$

Tab. 1

## Новая классификация мостов по системам и схемам соединения элементов

Система Схема	Омическая $(\frac{R}{R}) \cdot \frac{R}{R}$	Резонансная $(\frac{\omega L}{\omega C}) \cdot (A)^0$	Индуктивная $(\frac{L}{L}) \cdot \frac{1}{A}$	Емкостная $(\frac{C}{C}) A$	Взаимоиндук- тивная $(\frac{L}{M}) \cdot \frac{1}{A}$	Индуктивно- емкостная $(L \cdot \frac{1}{C}) \cdot \frac{1}{\Gamma}$	Емкость мощности $(C_x)$
Резонансный способ соединения $Z_0$ и $Z_X$	—	—	1 	2 	3 	4 	5 
Взаимоиндуктивный способ соединения $Z_0$ и $Z_X$	$\frac{Z_0 + 1}{Z_0}$ или $Z_0 (Z_0 + 2)$	$\frac{Z_0}{Z_0}$ или $Z_0 (Z_0 + 2)$	—	—	—	—	—
Вид элементов диапазона	$\vartheta_\beta = \lambda_\beta = 0$	$\vartheta_\beta \neq 0$ или $\lambda_\beta \neq 0$	$\vartheta_\beta = \lambda_\beta = 0$	$\vartheta_\beta = \lambda_\beta = 0$	$\vartheta_\beta = \lambda_\beta = 0$	$\vartheta_\beta = \lambda_\beta = 0$	$\vartheta_\beta = \lambda_\beta = 0$
$\vartheta_\beta \neq 0$ или $\lambda_\beta \neq 0$	—	—	—	—	—	—	—
$\vartheta_\beta = \lambda_\beta = 0$	$\frac{(R}{R}) \cdot \frac{R}{R}$	$\frac{(L, C, R) \cdot (R)}{R}$	$\frac{(L, R)}{R}$	$\frac{(C, R) \cdot R}{R}$	$\frac{[L, (M_I - V) / 2, R]}{R} R$	$\frac{(L, R_x, C, R) \cdot 1}{R \cdot R X} \frac{1}{R X R}$	$\frac{C, R}{R}$
$\vartheta_\beta = \lambda_\beta = 0$	—	—	—	—	—	—	—
$\vartheta_\beta = \lambda_\beta = 0$	$\frac{(R}{R \parallel R}) \cdot \frac{R}{R}$	$\frac{(L, R, (C \parallel R)) \cdot (R)}{R}$	$\frac{[L, R]}{(L, R) \parallel R} \cdot \frac{R}{R}$	$\frac{C, R}{(C, R) \parallel R} \cdot \frac{R}{R}$	—	$\frac{L, R_x}{(R, R, C) \parallel R} \frac{1}{R X R}$	$\frac{C, R}{R}$
$\vartheta_\beta = \lambda_\beta = 0$	—	—	—	—	—	—	—

**Заключение.** Разработанный способ условных обозначений мостовых схем дает возможность значительно упростить процесс вычисления уравнений равновесия (2б) 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 Х-образных мостовых схем.

*Пример.* Определить вид схемы и основную характеристику моста системы  $\left(\frac{C}{C}\right) \frac{R}{R}$ , собранного по схеме

$$\left( \frac{C, R}{C_n, R} \right) \frac{R}{R \parallel C_n} \left| \begin{array}{l} 1 \text{ мкф} \\ 100 \text{ нф} \end{array} \right.$$

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 уравновешивается изменением двух емкостей

*C<sub>0</sub>* и *C<sub>d</sub>*. Схема предназначена для измерения конденсаторов от 100 пФ до 1 мкФ.

Мост следует искать в табл. 2 (схема вида  $a_b$ ) этому здесь:

$$\frac{R_x}{R_0} = A\theta_R \quad \text{и} \quad \frac{X_x}{X_0} = A\theta_x.$$

Согласно схеме:

$$\frac{Z_{\partial+1}}{Z_\partial} = A + jB, \quad \text{где} \quad A = \frac{R_{\partial+1}}{R_\partial}.$$

Мост принадлежит к емкостной системе (табл. 2) и в литературе называется схемой Шерхага. В соответствии с принятыми обозначениями можно сказать:

$$\frac{R_x}{R_0} = A (1 + \tan \varphi_0 \tan \vartheta_0);$$

$$\frac{X_x}{X_0} = A(1 - \operatorname{ctg} \varphi_0 \operatorname{tg} \vartheta_0).$$

Если считать, что сопротивления  $R_x$  и  $R_0$  определяют потери в конденсаторах  $C_x$  и  $C_0$ , то:

$$\frac{R_x}{R_0} = -\frac{\operatorname{tg} \delta_x}{\omega C_v R_0} = A(1 + \operatorname{tg} \varphi_0 \operatorname{tg} \delta_0),$$

$$\frac{X_x}{X_0} = A(1 - \operatorname{ctg} \varphi_0 \operatorname{tg} \vartheta_0)$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = A \omega C_x R_0 \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \delta_\theta}{\operatorname{tg} \delta_0} \right),$$

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{1}{A} \frac{1}{1 - \operatorname{tg} \delta_0 \operatorname{tg} \delta_\theta},$$

$$\sigma_R = \frac{\operatorname{tg} \delta_\theta}{\operatorname{tg} \delta_0} \text{ и } \sigma_c = -\operatorname{tg} \delta_0 \operatorname{tg} \delta_\theta.$$

При вычислении угла потерь  $A \approx \frac{C_0}{C_x}$ , получим при окончательно:

$$\operatorname{tg} \delta_x \approx \operatorname{tg} \delta_0 + \operatorname{tg} \delta_\theta = \operatorname{tg} \delta_2 + \operatorname{tg} \delta_3;$$

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{\frac{R_\theta}{R_{\theta+1}}}{1 - \operatorname{tg} \delta_0 \operatorname{tg} \delta_\theta} = \frac{\frac{R_3}{R_4}}{1 - \operatorname{tg} \delta_2 \operatorname{tg} \delta_3}.$$

Отсюда видно, что при указанном способе регулирования равновесия схемы, уравнения (6) будут независимы и при:

$$\operatorname{tg} \delta_2 = 0; (\sigma_c = 0).$$

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. Карапеев 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]



## Частотная компенсация вольтметров переменного тока

Доктор техн. наук, проф. В. Н. МИЛЬШТЕЙН

Московский государственный институт мер и измерительных приборов

Широкое применение электрических токов повышенных частот в современной технике приводит внимание приборостроителей к возможности увеличения частотного диапазона использо-

вия измерительных приборов электромагнитной системой.

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 изменениях 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.

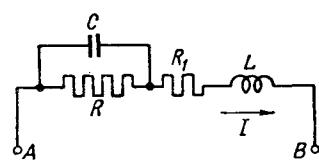


Рис. 1.

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

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  $Z(\omega)^2 = F(\omega^2)$  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:**  $\gamma_0(\omega) = \frac{|I(\omega)| - |I(0)|}{|I(0)|}$

$$|I(\omega)| = \frac{U}{|Z(\omega)|},$$

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, как условия для их существования в данном частном 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, прихо-

дит к выводу, что функция имеет один минимум на значении  $x$ , определяемом формулой:

$$(1+x)_{\text{екст}} = \frac{2\beta}{Q^2} [V2\beta + A - \beta].$$

Экстремум имеет место внутри интересующего нас интервала при выполнении условия

$$0 \leq \frac{2\beta}{Q^2} [V2\beta + A - \beta] \leq 2.$$

Предельными случаями являются:

а) случай

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\beta_1}{Q^2} [V2\beta_1 + A - \beta_1] &= 0, \\ \beta_1 &= 1 + \sqrt{A+1}. \end{aligned} \right\}$$

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

$$\frac{2\beta_2}{Q^2} [V2\beta_2 + A - \beta_2] = 2 \text{ или } V2\beta_2 + A = \frac{\beta_2^2 + Q^2}{\beta_2}.$$

$\beta_2$  проще всего найти графическим путем на абсциссе точек пересечения кривой  $V2\beta + A = f(\beta)$  с кривыми  $\frac{\beta^2 + Q^2}{\beta} = \varphi(\beta)$  (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 лежит

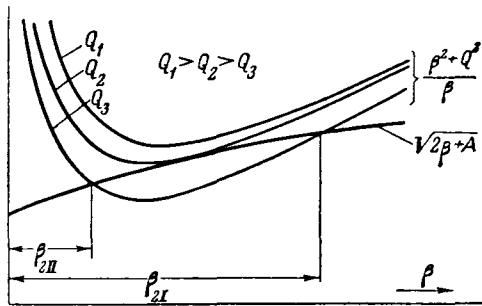


Рис. 2.

вызывается на верхней границе диапазона. Это значит, что при уменьшении  $\beta$  она выходит за пределы диапазона, а затем снова входит в него. 2. Подставляя (5) в (4), получаем:

$$\gamma(x_{\text{экст}}) = -\frac{2}{(A+1)^2} [\sqrt{2\beta+A} - \beta]^2. \quad (9)$$

Абсолютное значение  $|\gamma(x_{\text{экст}})|$  уменьшается с увеличением  $\beta$  (с уменьшением  $C$ ).

Действительно,

$$\begin{aligned} \frac{d|\gamma(x_{\text{экст}})|}{d\beta} &= \frac{4}{(A+1)^2} [\sqrt{2\beta+A} - \beta] \times \\ &\times \left[ \frac{1}{\sqrt{2\beta+A}} - 1 \right], \end{aligned}$$

$$[\sqrt{2\beta+A} - \beta] \equiv (1+x)_{\text{экст}} > 0,$$

$$\left[ \frac{1}{\sqrt{2\beta+A}} - 1 \right] < 0, \text{ так как } A \geq 1 \text{ и } \beta > 0,$$

тогда

$$\frac{d|\gamma(x_{\text{экст}})|}{d\beta} < 0.$$

3. Для определения значения  $\gamma(x)$  на верхней границе интервала подставим в выражение (4) значение  $x=1$

$$\gamma(1) = \frac{2}{(A+1)^2} Q^2 \left[ 1 - \frac{2\beta+A}{\beta^2+Q^2} \right], \quad (10)$$

и 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  $\gamma(1) = 0$ ,ходим, приравнивая (10) нулю<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> При  $Q^2 < A$  соответствующее уравнение имеет один положительный действительный корень  $\beta$ .

При  $A+1 > Q^2 > A$  уравнение имеет два положительных действительных корня.

При  $Q^2 > A+1$  уравнение не имеет действительных корней.

В первом случае увеличение емкости  $C$  (уменьшение  $\beta$ ) вызывает перемещение точки пересечения кривой  $\gamma(x)$

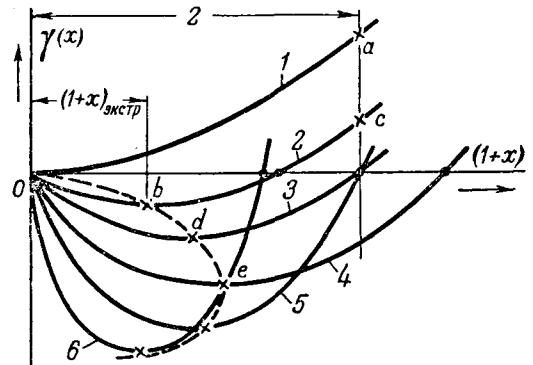


Рис. 3.

$$\beta_{31} = \frac{L}{C_{31} R^2} = 1 + \sqrt{A+1-Q^2}, \quad (11)$$

$$\beta_{3II} = \frac{L}{C_{3II} R^2} = 1 - \sqrt{A+1-Q^2}. \quad (12)$$

Сопоставление (11) и (10a) показывает, что при  $Q^2 < A+1$  имеет место неравенство

$$\beta_{3I} > \beta_a. \quad (13)$$

Это означает, что при  $\beta > \beta_{3I}$  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

$$C = C_{3I} = \frac{L}{R^2} \frac{1}{1 + \sqrt{A+1-Q^2}},$$

$\gamma(x)$  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  $C$  возвращаетсѧ внутрь интервала. В третьем случае точка остается в пределах интервала при любом выборе емкости  $C$ , никогда не достигая его верхней границы.

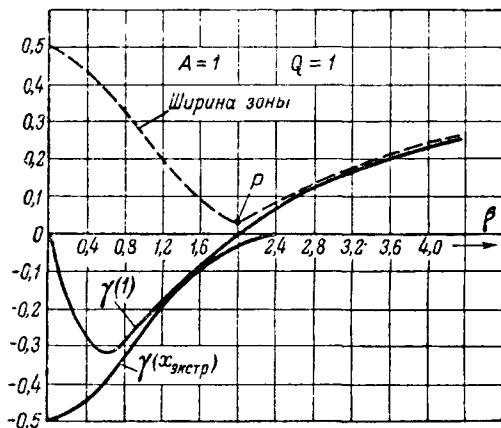


Рис. 4.

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:

$$\gamma(1) - \gamma(x_{\text{экстр}}) = \frac{2}{(A+1)^2} \times \times \left\{ Q^2 \left[ 1 - \frac{2\beta + A}{\beta^2 + Q^2} \right] + [\sqrt{2\beta + A} - \beta]^2 \right\}. \quad (16)$$

При  $\beta \leq \beta_{31}$  ширина зоны

$$|\gamma(x_{\text{экстр}})| = \frac{2}{(A+1)^2} [\sqrt{2\beta + A} - \beta]^2. \quad (17)$$

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, определяющейся 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 3 рис. 3.

При этом

$$\Delta = \frac{|\gamma(x_{\text{экстр}})|}{2}.$$

Подставляя (11) в (9), получим:

$$\Delta = \left( \frac{1}{A+1} \right)^2 [1 + \sqrt{A+1-Q^2}]^2 \times \times \left[ 1 - \sqrt{1 + \frac{Q^2}{[1 + \sqrt{A+1-Q^2}]^2}} \right]^2. \quad (18)$$

Если при этом выполняется условие

$$\left[ \frac{Q}{1 + \sqrt{A+1-Q^2}} \right]^2 \ll 1, \quad (19)$$

то на основании (18) приходим к приближенной формуле:

$$\Delta \approx \frac{1}{4} \frac{1}{(A+1)^2} \frac{Q^4}{[1 + \sqrt{A+1-Q^2}]^2}. \quad (20)$$

Из равенства (20) видно, в сколь сильной степени зависит погрешность от значения  $Q$   $= \frac{\omega_u L}{R}$ . Так, при  $A = 1$ ,  $(R_1 = 0)$  и  $\frac{\omega_u L}{R} \approx 0,9$

$$\Delta \approx 0,9\%; \quad \text{при } A = 1 \text{ и } \frac{\omega_u L}{R} = 1,2, \quad \Delta \approx 4\%.$$

Такая резкая зависимость  $\Delta$  от  $Q$  заставляет в практических случаях выбирать  $Q < 1$ , при этом выполняется условие ( $Q \leq 1,2$ ) оптимально выбранного закона распределения  $\gamma(x)$ , а также неравенство (19).

При  $Q < 1$  можно пользоваться следующими приближенными формулами для  $\Delta$ ,  $\beta_{31}$  и  $C_3$ :

$$\Delta = \frac{1}{4} \frac{Q^4}{(A+1)^2 (1 + \sqrt{A+1})^2} \times \times \left[ 1 + \frac{Q^2}{(1 + \sqrt{A+1}) \sqrt{A+1}} \right] \quad (21)$$

или более грубо

$$\Delta \approx 0,25 \frac{Q^4}{(A+1)^2 (1 + \sqrt{A+1})^2} \approx \frac{0,06 (\omega_u L)^4}{R_2^2 (R + \sqrt{2R_1 R_2})^3} \quad (22)$$

где  $R_2 = R_1 + R$ .

На основании (11),

$$\begin{aligned} \beta_{31} &= 1 + \sqrt{A+1-Q^2} \approx 1 + \sqrt{A+1} - \\ &- \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\sqrt{A+1}} = 1 + \sqrt{2 \frac{R_2}{R}} - \\ &- 0,35 \frac{(\omega_u L)^2}{\sqrt{R_2 R^3}} \end{aligned} \quad (23)$$

<sup>2</sup> Идея использования графика кусочно-непрерывной функции для исследования ширины зоны изменений  $\gamma(x)$  принадлежит Л. М. Заксу.

$$C_{31} = \frac{L}{R^2} \frac{1}{1 + \sqrt{2 \frac{R_{\Sigma}}{R} - 0,35} \frac{(\omega_{\mu} L)^2}{\sqrt{R_{\Sigma} R^3}}}. \quad (22)$$

Среди полученных формул особое внимание заслуживает (20б). Из этой формулы следует, что минимально-достижимая погрешность  $\Delta$  прямо пропорциональна четвертой степени ширины частного диапазона использования вольтметра  $\omega_{\mu}$  и четвертой степени индуктивности рабочей катушки прибора. При данном входном сопротивлении вольтметра  $R_{\Sigma} = R_1 + R$  она резко возрастает с уменьшением  $R$ . Поэтому лучшие результаты могут быть 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, изменения  $\frac{R_1}{R}$  при данном значении  $R_{\Sigma} = R_1 + R$ , имеется возможность изменять  $\beta_{31}$ , компенсируя влияние отклонения  $L$  и  $C_{31}$  от номинальных значений, что особенно важно в условиях производства.

При  $R_1 = 0$  (и соответственно при  $R_{\Sigma} = R$ ) погрешность в процентах:

$$\Delta \approx \left( \frac{\omega_{\mu} L}{R_{\Sigma}} \right)^4. \quad (20\sigma)$$

**Определение оптимального значения компенсирующей емкости  $C$  при градуировке вольтметра без сдвига.** В условиях производственного токе с нанесением делений шкалы какого бы то ни было корректирования. В 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  $\gamma_{\text{имп}}$ , либо  $|\gamma(1)|$  в зависимости от того, какая из величин больше. Так было показано,  $|\gamma(x_{\text{експ}})|$  уменьшается с увеличением  $\beta$ , а  $|\gamma(1)|$  — растет. Поэтому наилучший результат имеет место при значении  $\beta = \beta_4$ , соответствующем условию

$$|\gamma(x_{\text{експ}})| = -\gamma(x_{\text{експ}}) = \gamma(1). \quad (23)$$

Подставляя в (23) выражения для  $\gamma(x_{\text{експ}})$  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 найдется, используя некоторые установленные ранее свойства 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  $x_{\text{експ}} = -1$  и  $\gamma(x_{\text{експ}}) = 0$  [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,  $\beta_{31} < \beta < \beta_1$ ).

Заменяя 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

$$\beta = \beta_1 = 1 + \sqrt{A + 1}, \quad \gamma(x_{\text{експ}}) = 0;$$

$$w(\beta) = [\sqrt{2\beta + A} - \beta]^2 \approx w(\beta_1) +$$

$$+ \frac{d\omega}{d\beta_{\beta=\beta_1}} (\beta - \beta_1) + \frac{1}{2!} \frac{d^2\omega}{d\beta_{\beta=\beta_1}^2} (\beta - \beta_1)^2 =$$

$$= \frac{A + 1}{(1 + \sqrt{A + 1})^3} (\beta - \beta_1)^2 =$$

$$= \frac{A + 1}{(1 + \sqrt{A + 1})^2} [(\beta - \beta_3) + (\beta_3 - \beta_1)]^2.$$

Согласно (21)

$$\beta_3 - \beta_1 = -\frac{1}{2} \frac{Q^2}{\sqrt{A + 1}},$$

откуда

$$w(\beta) \approx \frac{A + 1}{[1 + \sqrt{A + 1}]} \left[ \frac{Q^2}{2\sqrt{A + 1}} - (\beta - \beta_3) \right]^2. \quad (26)$$

Приравнивая  $z(\beta)$  и  $w(\beta)$ , получаем после преобразований

$$\beta_4 - \beta_3 = 0,09 \frac{Q^2}{\sqrt{A + 1}},$$

откуда

$$\beta_4 = 1 + \sqrt{A+1} - 0.41 \frac{Q^4}{\sqrt{A+1}} = \\ = 1 + \sqrt{2 \frac{R_\Sigma}{R}} - 0.29 \frac{(\omega_m L)^2}{\sqrt{R_\Sigma R^3}}. \quad (27)$$

Поскольку в данном случае погрешность  $\Delta = |\gamma(x_{\text{экстр}})|$ , то подставляя (27) в (9), получаем:

$$\Delta \approx 0.36 \frac{Q^4}{(A+1)^2 (1 + \sqrt{A+1})^2} = \\ = 0.09 \frac{(\omega_m L)^4}{R_\Sigma^2 (R + \sqrt{2R_\Sigma R})^2}. \quad (28)$$

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  $M_{\text{эм}} = I^2 \frac{dL}{da}$ . 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  $U_\kappa$ , 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  $U_\kappa$  функция  $\gamma(x)$  выражалась кривой 2 рис. 5, то при измерении напряжений, больших  $U_\kappa$ , зависимость  $\gamma(x)$  вследствие увеличения индуктивности рабочих катушек прибора приобретает вид кривой 1 [ $|\gamma(1)|$  увеличивается,  $|\gamma(x_{\text{экстр}})|$  уменьшается]. При измерении  $U < U_\kappa$  эта зависимость приобретает вид кривой 3 [ $|\gamma(1)|$  уменьшается,  $|\gamma(x_{\text{экстр}})|$  возрастает].

Рассмотрим случай компенсации на краю шкалы, когда  $U_\kappa = U_{\text{макс}}$ , в предположении, что индук-

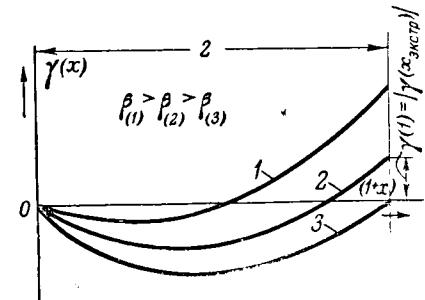


Рис. 5.

тивность рабочих катушек находится в линейной зависимости от измеряемого напряжения:

$$L = L_{\text{мин}} + aU; L_{\text{макс}} = L_{\text{мин}} + aU_{\text{макс}}.$$

На основании (27) имеем:

$$\beta = 1 + \sqrt{A+1} - 0.41 \frac{Q_{\text{макс}}^2}{\sqrt{A+1}},$$

где

$$Q_{\text{макс}} = \frac{\omega_m L_{\text{макс}}}{R}$$

и

$$C_1 = \frac{L_{\text{макс}}}{R^3} \frac{1}{1 + \sqrt{A+1} - 0.41 \frac{Q_{\text{макс}}^2}{\sqrt{A+1}}}.$$

Поскольку при максимальной величине измеряемого напряжения ( $L = L_{\text{макс}}$ ) значение  $|\gamma(1)| = |\gamma(x_{\text{экстр}})|$ , то для всех остальных точек шкалы погрешность определяется значением  $|\gamma(x_{\text{экстр}})|$ .

На основании формул (9), (29) и (30) получаем:

$$\Delta = \frac{2}{(A+1)^2} \times \\ \times \left\{ \sqrt{2 \left[ 1 + \sqrt{A+1} - 0.41 \frac{Q_{\text{макс}}^2}{\sqrt{A+1}} \right] \left[ 1 - \frac{a(U_m - U)}{L_{\text{макс}}} \right] + \left[ 1 + \sqrt{A+1} - 0.41 \frac{Q_{\text{макс}}^2}{\sqrt{A+1}} \right] \left[ 1 - \frac{a(U_m - U)}{L_{\text{макс}}} \right]}} \right\} \quad (3)$$

Введем обозначения

$$1 + \sqrt{A+1} = \beta_1; \quad 0.41 \frac{Q_{\text{макс}}^2}{\sqrt{A+1}} = \Delta\beta; \\ \frac{a(U_m - U)}{L_{\text{макс}}} = \xi. \quad (3)$$

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 потокосцепления катушек к току  $I$  в катушках.

авенство (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:

$$\Delta_{np} = \frac{2}{(A+1)^2} \left[ \frac{0,41 Q_{\max}^2}{1 + \sqrt{A+1}} + \sqrt{A+1} \times \right. \\ \left. \times \frac{aU_m}{L_{\max}} \left( 1 - \frac{U}{U_m} \right) \right]^2 \frac{U}{U_m}. \quad (35)$$

Функция  $f\left(\frac{U}{U_m}\right)$  имеет максимум при

$$\frac{U}{U_m} = \left( \frac{U}{U_m} \right)_{\text{экспр}} = \\ = \frac{1}{3} \left[ 0,41 \frac{Q_{\max}^2}{(1 + \sqrt{A+1}) \sqrt{A+1}} \cdot \frac{L_{\max}}{aU_m} + 1 \right]. \quad (36)$$

$$\Delta_{np, \max} = \left( \frac{2}{A+1} \right)^2 \frac{2}{\sqrt{A+1}} \cdot \frac{L_{\max}}{L_{\max} - L_{\min}} \times \\ \times \frac{1}{27} \left[ \frac{0,41 Q_{\max}^2}{1 + \sqrt{A+1}} + \sqrt{A+1} \left( 1 - \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \right) \right]^3. \quad (37)$$

Максимум имеет место при  $U < U_m$  при соблюдении неравенства

$$0,41 \frac{Q_{\max}^2}{(1 + \sqrt{A+1}) \sqrt{A+1}} \frac{L_{\max}}{aU_{\max}} < 2. \quad (38)$$

В противном случае максимальная приведенная погрешность получается при  $U = U_m$  (на ще шкалы).

Можно утверждать, что максимальное значение приведенной погрешности может быть уменьшено, если компенсация осуществляется не при  $U_m$ , 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 работыют возможность рационального выбора параметров схемы частотной компенсации вольтметра переменного тока.

2. Разработанная методика может быть использована для рассмотрения вопросов, не нашедшихражения 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. Методика

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 уклоняющихся 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 часто 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.

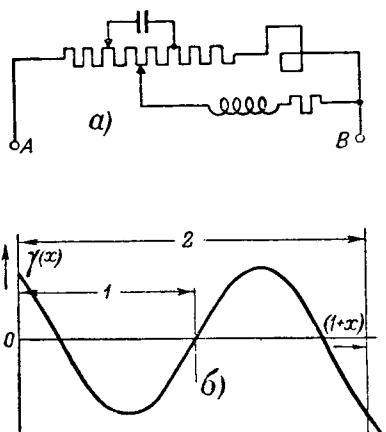


Рис. 6.

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  $\gamma(x) = k_1 \left( x^2 + \frac{k_1}{k_2} x + \frac{k_0}{k_2} \right)$ , 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 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, компенсированные первого, второго, ...,  $n$ -ного порядка. Число экстремумов функции  $\gamma(x)$  при надлежащем выборе параметров элементов компенсации (при котором) число максимального.

Для выбора параметров компенсированной схемы первого порядка, примером которой является схема, мы ограничивались первыми тремя членами ряда для решения той же задачи для компенсированной схемы  $n$ -ного порядка удерживаем первые  $(n+2)$  членов 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 независящим 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 определены 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,  $\gamma(x) = -|\gamma_{\max}| \left( x^3 - \frac{3}{4}x \right)$  (рис. 6, б).

Следует заметить, что в случае градуировки без схемы, когда величина  $A_0$  находится из условия  $\gamma(-1) = 0$ , можно воспользоваться таким же приемом, но тогда уже не приходим к полиномам Чебышева (системе Чебышева с нулевой точкой).

#### Литература

1. Н. И. Ахиэзер. Лекции по теории аппроксимации. Государственное технико-теоретическое издательство, 1947.

[8, 6, 19]



## Дмитрий Александрович Лачинов

*К 50-летию со дня смерти*

8 (15) октября 1902 г. в Петербурге умер из выдающихся русских физиков и электротехников Дмитрий Александрович Лачинов.

Именем Д. А. Лачинова связана целая эпоха русской и мировой электротехники. Дмитрий Александрович принадлежал купе русских физиков, юдших хорошую школу руководством знаменитого русского академика Ленца и стремившихся же и полнее изучить образные свойства электричества с целью выясня всех возможностей его практического использования исследования различных основ теории.

Д. А. Лачинов родился 10 мая 1842 г. в г. Шацкано оставшись сиротой, прий Александрович был в пансион 1-й Петерской гимназии, по окончании которой в 1859 г. поступил на физико-математический факультет Петербургского университета. Реопротив студенчества, принятые в 1861 г. царствительством в связи

революционными выступлениями, связанными с крестьянскими «бунтами» против помещиков, чились закрытием 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 слушал лекции и работал в лабораториях известных физиков — Бунзена, Кирхгофа и Гельмгольца. Возвратясь в Россию (1863 г.), Лачинов в 1864 г. окончил университет, а в следующем году представил «рассуждение» (диссертацию) на первую степень кандидата наук. Степень эта была присуждена ему Советом Петербургского университета 20 декабря 1865 г.

Интересовавшись еще в университете электрикой, Лачинов с первых дней своей самостоятельной работы в Петербургском землемерном (позднее переименованном в Лесной) институте начал последовательную разработкунейших ее проблем. Так, в конце 60-х г.г., одной из важнейших проблем электротехники было усовершенствование источников элек-

трического 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 диафанскопа, 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, становился 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 сформулирован 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 экспонированные на выставке оригинальный оптический динамометр, значительно упрощавший замеры мощности, виваемой 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 русские электротехники, видевшие в успехах практического 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 проблемой параллельного и смешанного включения ламп. В блестящей статье «О параллельном включении электрических ламп» [Л. 5] Лачинов провел глубокого анализа условий работы дуговых ламп и применявшимся для создания устойчивости 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 разработанную 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 столицы. В 1881 г. Дмитрий Александрович предложил оригинальный способ измерения света уличных фонарей, значительно упрощавший замеры, а позднее он усовершенствовал распространенный в те годы компенсационный фотометр. Одновременно Лачинов выступил с идеей создания центральной станции фотометрии и добился участия России в заключении международной конвенции об установлении единых светотехнических единиц.

В эти же годы Д. А. Лачинов занимался усовершенствованием свинцовых аккумуляторов и 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 электролиза

ш [Л. 9]. Разработав два варианта конструкции специальной батареи для электролиза, Д. А. Лачинов получил на это изобретение привилегии во Франции, Англии, Германии, Бельгии и подал заявку на привилегию в России. Итак, необходимо отметить, что в описании этого изобретения 1889 г. Лачинов указывал на возможность использования получаемого при электролизе воды города для обогащенного дутья в металлургическом производстве и др.

К этому же периоду относятся разработка финовым (совместно с А. Г. Щавинским) системы контроля за состоянием изоляции высоковольтных проводов и кабеля и создание осциллографа — 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 несомненно, заслуживали внимания. Работа с созданием новых приборов еще раз показывает, с каким неослабным вниманием следил Дмитрий Александрович за успехами молодой электротехники и главным образом техники высокого 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 документах, 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 вызывая многим из них значительную помощь. Так, в 1884 г. Н. Н. Бенардос впервые в мире провел дуговую электрическую сварку металлов. Дмитрий Александрович оказал ему большую помощь своими советами (например, указанием возможности подводной сварки металлов и др.) и первый изложил сущность изобретения Бенардоса в докладе Русскому физико-химическому обществу, а затем описал это в журнале «Электротехничество» [Л. 11]. Лачинов впоследствии не раз вступал в защиту приоритета Н. Н. Бенардоса и широко пропагандировал применение электротехнической сварки металлов.

Со всей страстью глубокого патриота Лачинов протестовал против забвения русских изобретателей и преклонения перед иностранными именами. Тайная своей приоритет в изобретении аккумуляторов с пластинами из губчатого свинца и пропускания против беззастенчивого использования странцами его идеи, Лачинов писал в редакцию журнала «Электротехничество»: «Пишу Вам это для того, чтобы протестовать против привелегии Де-Монто, но только для того, чтобы отдать честное 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 прививаются 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 грохотметчика, 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. Чиколов, Н. Н. Бенардос, А. И. Полешко, С. Степанов, А. Л. Линев и мн.

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. Чиколова, 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, Владимира 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. Особенno 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 свидетельствовать, 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 готовкой к завтрашнему чтению, обложенного книгами и журналами и делающего заметки в программе своего предстоящего чтения» [Л. 16].

Придавая большое значение экспериментальной работе студентов, Лачинов ввел в Ленинградском институте практические занятия в организованном 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 другого кружка физиков и электротехников из прошлого столетия. Необыкновенно тепло вспоминают 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 электротехнике 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 звучит 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, № 8.
3. Электричество, стр. 269, № 18—19, 1882.
4. Записки Русского технического общества, вып. Технические беседы, стр. 32—74, 1882.
5. Оттиски 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. стр. 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. стр. 2—3, 1898.
16. Газета „Русский инвалид“ № 250, 1897 г. Телеграфование без проводов.
17. Электричество, стр. 205, № 9—10, 1890.
18. Известия СПБ Лесного института, вып. IX, № 4, 1944.

*Как диджитат техн. наук Б. Н. РЖОНСНИЦКИЙ*

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 достиженияились в таких отраслях промышленности, которые до революции либо совсем в России не существовали, либо имели мелкий масштаб и не решали 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 совершенствований в светотехнике;
- 3) ознакомление с историей развития светотехники путем демонстрации на исторических монатах приоритета русских изобретателей в области электрического освещения (Петров, Мочков, Лодыгин и др.);
- 4) пропаганда в широких слоях трудящихся начиная с 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 началась не только как производственно-техническое, 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 1 556 м<sup>2</sup>, не считая вспомогательных и конторских помещений. Выставка организовалась с исключительной быстрой, 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) фотокинотехнический; 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, созванная 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, принятые 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 киносъемочных прожекторов. Повидимому, уже тогда зарубежным светотехническим заводам, производящим лампы, осветительную арматуру и прожекторы, было ясно,

что советская промышленность полностью ~~п~~ печивает потребности страны в этом ~~рода~~ ~~и~~ ции, причем качество советских светотехнических изделий считалось достаточно высоким.

Во время выставки было прочитано 12 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 «Печатное дело», № 2/9 за 1927 г.

4 января 1928 г. Экспертный комитет выставки закончил присуждение наград экспонентам (почетных дипломов, почетных аттестатов, медалей и поощрительных отзывов).

Значение выставки было весьма замечательно. Чувствовалось в течение всей первой пятницы. Для советской науки и техники эта выставка была, несомненно, значительным моментом, дающим сильный импульс как для дальнейшей разработки научных проблем светотехники, так и для расширения применений света на практике. Выставка, несомненно, способствовала подъему культуры в области светотехники, стимулируя стремление к более совершенному использованию электроэнергии для целей освещения. Более 100 тысяч человек, посетивших выставку, получили наглядное представление о степени развития имеющихся 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 Яблочкива, лампы накаливания дыгина, дуговые лампы Чиколева и др.

За четверть века после Первой всесоюзной светотехнической выставки наша страна, выделяя планы сталинских пятилеток, стала первой индустриальной державой. Выросла и выросла 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



# Статье Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиноуского „О схемах городских электрических сетей в связи с многоэтажным строительством“

(Электричество, № 12, 1951)

Кандидат техн. наук, доц.  
Б. Л. АЙЗЕНБЕРГ

ЛИИ им. Молотова

В статье Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиноуского право указана и достаточно обоснована необходимостьхода от существующих несовершенных схем электрической распределительной сети среднего напряжения к более совершенным. Содержащееся в статье предложение ожышении надежности электроснабжения потребителей и применения двухлучевой схемы с переплетением магистралей представляет несомненный интерес. В отдельных случаях, когда требуется 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 неудобно.

Рассмотренный в статье новый жилой массив, состоящий из одинаковых кварталов в виде квадратов, отнюдь является типовым даже для Москвы, не говоря уже о Енисиаде 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 зданий и других параметрах. Поэтому предложенное выше 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 сетевым трансформаторным станциям не вызывали 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 ту, приходящуюся на один квартал, в то время следовало бы рассматривать сеть всего жилого массива. Тогда результаты сопоставления были совсем иными.

Примем нагрузку квартала равной примерно 100 квт, сечение кабеля 10 квт- $3 \times 50 \text{ mm}^2$  и сравним три варианта сети: 1) сеть, выполненную по двухлучевой схеме, с одной сетево-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 в статье, не дает увеличения расхода кабеля по сравнению с первым вариантом. Попутно утверждение Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиноуского о том, что второй вариант сети стоит вдвое дороже, чем первый, не обосновано верно. 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 вдвое 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 однотрансформаторная, 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 квт 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 тыс. руб., а годовые потери энергии — 63 400 квт т. е. меньше, чем при

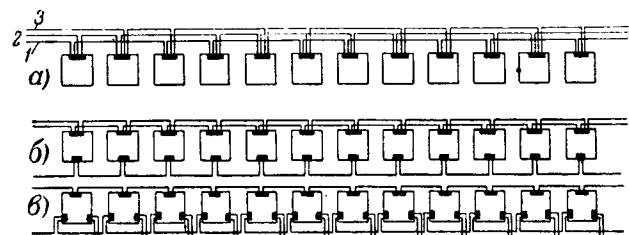


Рис. 1. Схема распределительной сети среднего напряжения.

а — двухлучевая схема сети; в каждом квартале одна сетевая трансформаторная подстанция с двумя трансформаторами по 320 квт; б — замкнутая схема сети без сетевых автоматов; в — в каждом квартале две сетевые трансформаторные подстанции, из которых одна с двумя трансформаторами по 180 квт, а другая с одним трансформатором 180 квт; в — замкнутая схема сети без сетевых автоматов; в — в каждом квартале три сетевые трансформаторные подстанции с трансформаторами по 180 квт.

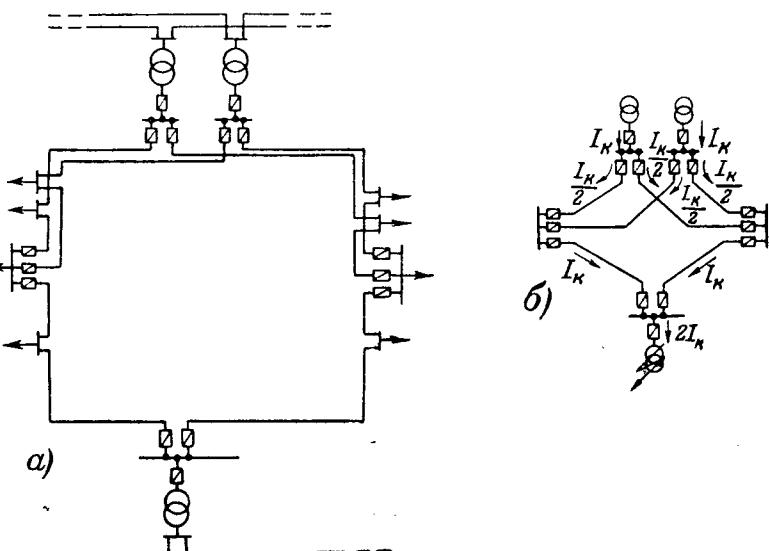


Рис. 2.

а — замкнутая схема сети без сетевых автоматов; в каждом квартале две сетевые трансформаторные подстанции, из которых одна с двумя трансформаторами по 180 квт и другая с одним трансформатором 180 квт; б — распределение токов при коротком замыкании в сети среднего напряжения; избирательность защиты обеспечивается одной серией плавких вставок.

двулучевой схеме рис. 1,а (см. табл. 1 и 2 статьи Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиноуского). 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. Сербиноуского 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 однотрансформаторных подстанций без автоматики.

Обоснование отказа от распределительных пунктов среднего напряжения мало убедительно; в частности, не понятно, 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 однотрансформаторные 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. Сербиноуского. Следует особо подчеркнуть два следующих весьма существенных положения, выдвинутых ими:

1. Сеть повышенной надежности (двулучевая 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 установленной 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 потребителя, 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. Сербиноуский 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 × 120 м<sup>2</sup>, 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 вызвать возражений.

Однако кварталы большинства наших городов состоят из многоэтажными домами высотой 7 и выше. 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 схема повышает надежность работы сети низкого напряжения, позволяет отказаться от дублирования кабелей.

Технико-экономические показатели различных типов сети мощностью 6 500 квт в одном из районов строительства Ленинграда, полученные в результате, приведены в таблице<sup>1</sup>. Эти показатели обе сеть низкого напряжения, сеть среднего напряжения трансформаторные подстанции.

Показатели	Замкнутая схема в виде треугольников	Замкнутая схема в виде сетки	Дифференция
Длина кабеля, % . . . . .	100	109	
Расход приведенного к меди цветного металла, % . . . . .	100	82	
Общая стоимость, % . . . . .	100	99	
Единичная мощность сетевой трансформаторной подстанции, квт . . . . .	1×320	1×320	2×1

Данные таблицы показывают, что двухлучевая сеть по сравнению с замкнутой схемой в виде сетки не имеет преимуществ по расходу цветных металлов и является самой дорогой. Если к этому добавить недостаток двухлучевой схемы в части сети низкого напряжения, стоящей 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 новых, застраиваемых домов в 7 и ниже этажей, принять 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. Сербиноуского вызывает возражения. Сравнение с одной, двумя и тремя трансформаторными подстанциями при суммарной мощности 480 квт вызывает удивление. Скорее очевидно, что при больших плотностях грузки (в данном примере они предельно высоки), трансформаторы мощностью 100 квт явно невыгодны. Одно же варианта сети с незначительной суммарной мощностью вообще не имеет смысла, и результаты такого решения не могут быть обобщены.

Цены, принятые для экономических расчетов, жены; повидимому, не учтена строительная стоимость встроенных трансформаторных подстанций. Стоимость трансформаторов включения резерва, включая сюда 6 спаренных контакторов 600 а со всеми дополнительными принадлежностями и монтажом, принята равной 3...4 тыс. руб. сильно преуменьшено. Если учесть эти поправки, то стоимость повышения этажности технико-экономическое значение вариантов будет не в пользу двухлучевой схемы.

Несмотря, однако, на эти возражения, двухлучевая схема является одной из возможных рациональных схем городской электроснабжения, обеспечивающей повышенную надежность электроснабжения зданий с числом этажей более 7. Но она не может быть рекомендована при застройке города домами в 7 и ниже этажей.

<sup>1</sup> Расчеты выполнены И. Ф. Кузнецовым.

# 10 страницам технических журналов

## 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 радиоаппаратуры 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 входят в систему частотной манипуляции. Электронные лампы с питанием катодов переменным током позволяют создать новый тип радиовещательных передатчиков. Качество ламп увеличивается благодаря применению циановых тиатронных выпрямителей, плавно поднимающих напряжение на анодах ламп. Новые возбудители для радиовещательных диапазонов обеспечивают стабильность частоты, превосходящую международные нормы. Для измерения и контроля частот радиостанций с амплитудной частотной модуляцией создано устройство, позволяющее измерять частоты до 60 мегц 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 бумаги конденсаторов, разработанных в СССР, самовосстанавливаются после пробоя; новые непроводочные сопротивления имеют в пять раз меньший объем, чем углеродные сопротивления; начальная магнитная проницаемость нового типа магнитных феррокерамических материалов может изменяться в больших пределах (10...2000), а удельное сопротивление ферритов в миллиона раз больше, чем у новых мягких магнитных материалов.

Выпуск в СССР радиоприемников в 1951 г. увеличился вдвое по сравнению с последним предвоенным годом в 8 раз. Для приемников в районах, не имеющих электросетей, разработан довольно простой термогенератор (с использованием для выработки электроэнергии тепла обычной керосиновой лампы). Количество абонентских точек в сельских местностях за 1951 г. увеличилось на 193%, а в целом по стране более чем на 30%. В опытную эксплуатацию сдается новая многопрограммная вещания по трансляционным установкам.

Новой совершенной аппаратурой снабжены Московский, Ленинградский и Киевский телевизионные центры. Разработан типовой компактный, несложный в монтаже, юниорский в эксплуатации телевизионный центр для областных городов. Создана новая модель массового телевизионного 17-лампового приемника с трубкой с квадратическим отклонением и фокусировкой электронного луча; применение такой трубки не только упрощает конструкцию телевизора, облегчая его вес в сравнении (ВН-49 на 10 кг) и уменьшает потребляемую мощность (150 вт), но, кроме того, освобождает от появления на ее трубки так называемого ионного пятна, которое тепленно 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. разработана экспериментальная модель телевизора с экраном 14 см.

Бурными темпами развивается в СССР массовое радиовещание. 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 асбосцементных 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 применен кирпич. 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 с 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 вентиля.

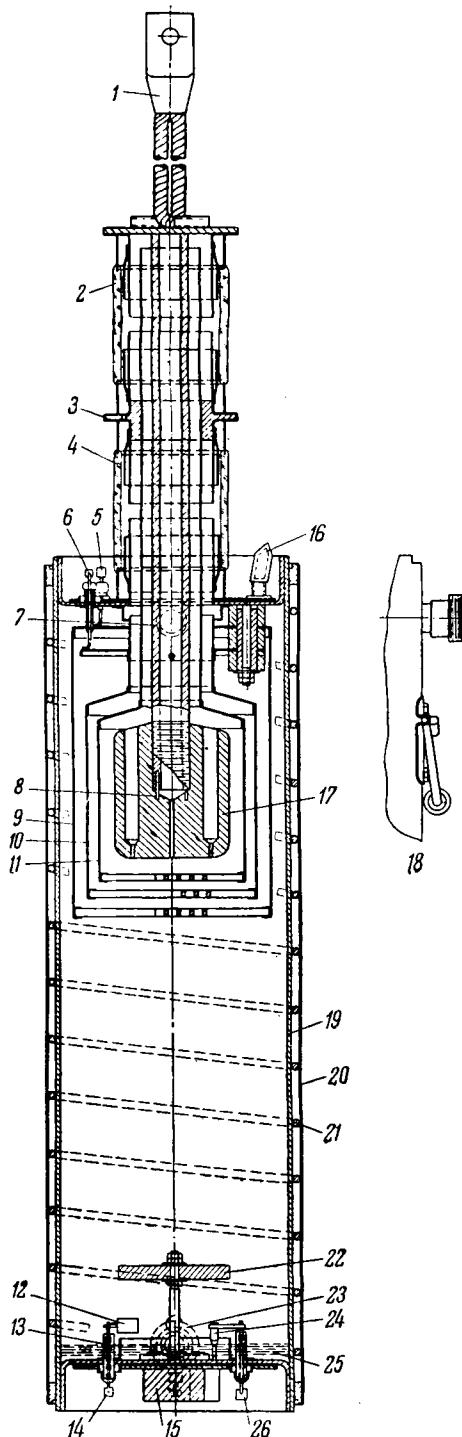


Рис. 1. Разрез игнитрона на 150 а, 20 кв.

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; 23—вход воды; 24—зажигатель; 25—ртуть; 26—вывод зажигателя.

Игнитрон на 150 а имеет три сетки: экранную, расположенную ближе к катоду, управляющую и градиентную. Экранная сетка способствует быстрой депенизации 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. 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 многофазного трансформатора присоединяется в трех точках к шинам игнитронам. Цепи управления питаются от отдельного вспомогательного трансформатора. Любая из шин постоянного тока может быть (если это необходимо) заземлена. Обе шины заземляются с помощью рубильника, перед которым открытые дверцы любого шкафа.

Ко вторичной обмотке главного трансформатора соединен RC фильтр, предохраняющий обмотки от перенапряжений при коммутации тока от баллона к баллону. Фильтр настроен на критическое демпфирование и имеет около 3,5 квт (для выпрямителя 2 500 квт).

Цепи возбуждения питаются от шин управления трансформатора фазорегулятора — фазорегулятор — шин фазорегулятора и разделительные трансформаторы. В следних 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, отпирающий вентиль только после того, как зажигатель вызвал появление катодного пятна.

Это предохраняет игнитрон от порчи, которая могла бы случиться, если бы такой импульс мог появиться на схеме при случайном отказе зажигателя. Градиентная сетка получает потенциал от средней точки потенциометра, включенного между анодом и катодом.

Все элементы и их цепи, естественно, распределены 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 каса шкафа. Обе сборки с игнитронами размещены рядом. Общий вид одного шкафа показан на рис. 4.

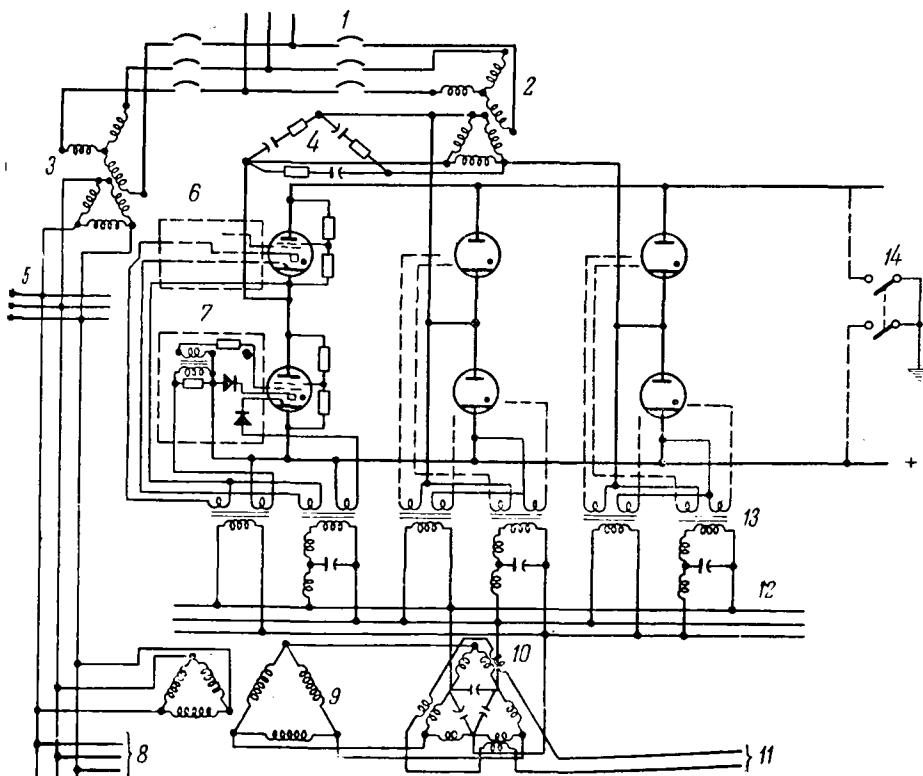


Рис. 3. Принципиальная схема высоковольтного игнитронного выпрямителя.

1—шины переменного тока; 2—силовой трансформатор; 3—вспомогательный трансформатор; 4—фильтр; 5—шины цепей управления; 6, 7—цепи с. ток.; 8—проводы к вспомогательным цепям; 9—трансформатор фазорегулятора; 10—фазорегулятор; 11—цепь управляющего тока; 12—цепь зажигателя; 13—разделительные трансформаторы; 14—заземляющий рубильник.

Разделительные трансформаторы, элементы схемы зажигания и патрубки (водяного охлаждения) смонтированы на днище шкафа. Сеточная аппаратура смонтирована полностью экранированных ящиках, что предохраняет ее от наведения посторонних э. д. с.

Для изоляции водяных рубашек игнитронов от заземленной системы водяного охлаждения они присоединяются к трубам системы посредством изоляционного шланга, а для применения 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 одревеснения воды перед пуском. Игнитроны 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 рефекторах. Подогреватели выпрямителя 7500 квт смонтированы непосредственно над баллонами игнитронов. 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, ее возможность пуска выпрямителя при температуре баллонов нормально допустимых пределов и при невключеных подогревателях анодов игнитронов.

Следует отметить, что по сообщению Главного управления электрификации железных дорог высоковольтные игнитронные выпрямители отечественного производства былиущены в нормальную эксплуатацию на электрифицированных железных дорогах СССР в 1945 г. Это подтверждает приоритет в данной отрасли техники.

(M.J. Mulhern. AIEE, Transactions. т. 69, ч. II, стр. 913, 1950)

Инж. Э. Г. УДЕРМАН

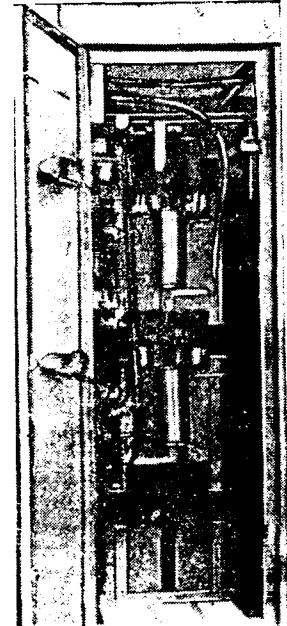


Рис. 4. Внутренний вид шкафа с игнитронной установкой на 2500 квт и 17 000 в, работающей от трехфазной линии 13,8 кв.

## 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

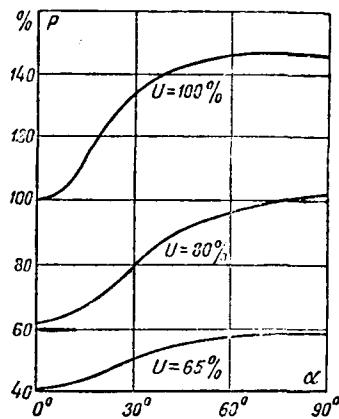


Рис. 1. Потери в стали ХВП в функции угла отклонения вектора индукции от направления проката.

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-

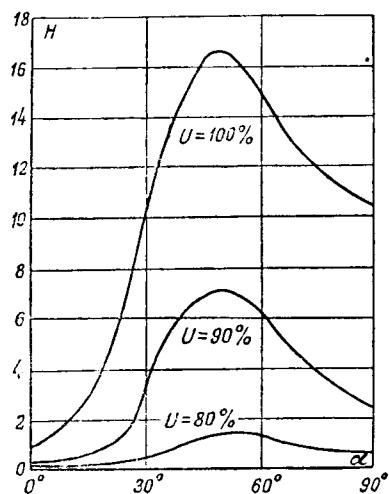


Рис. 2. Намагничивающая сила на единицу длины для стали ХВП в функции угла отклонения вектора индукции от направления проката.

$H$  — намагничивающая сила на единицу длины;  $\alpha$  — угол отклонения от направления проката.

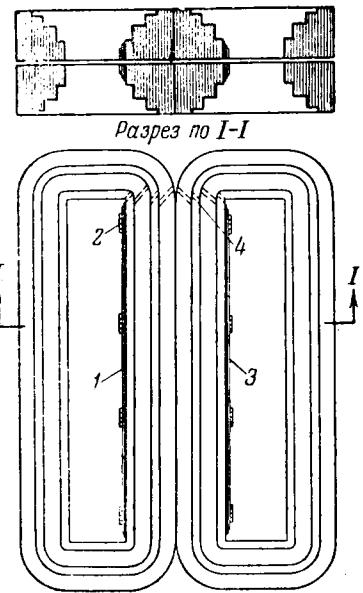


Рис. 3. Устройство сердечника, состоящего из четырех частей.  
1 — изолирующая усиливающая пластина; 2 — изолирующий хомут; 3 — усиливающая пластина; 4 — зона стыков.

нием проката стали. Наилучшим образом этому требование 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 применяма 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 скосенными стыками между листами одного слоя. Очевидно, что в этой конструкции лишь частично разрешается вопрос наилучшего использования магнитных свойств стали ХВП, так как, несмотря на скосенные стыки в углах сердечника, все же имеет место отклонение вектора



Рис. 4. Четвертая часть однофазного намотанного сердечника.



Рис. 5. Намотанный сердечник в процессе сборки трансформатора.

Обмотки уже насыжены на стержень. Для их насадки были отогнуты полоски стали, опирающиеся на подставку. Справа часть пакета 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 ширин и сравнительно большой длины, которые и используются в описанной 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 достаточно 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 ярусами, 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 3 300 ква. При этом в каждый «виток» стали получается лишь по одному стержню.

Начиная от крайнего внутреннего витка стали и краинему наружному витку, длина отдельных полос пропорционально возрастает. Если, таким образом, горизонтально расправить все полоски и сложить их друг с другом, то они образовали бы трапецид с одной прямой угловой стороной. Такие ступенчатые по длине полосы стали изготавливают путем резки длинной полосы на математических ножницах, заранее установленных на отремонтированное приращение длины после каждого удара. Всегда за этим на отрезанные полосы наносится изоляционный слой, после чего их собирают пакетами, придают им коническую 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 весь сердечник.

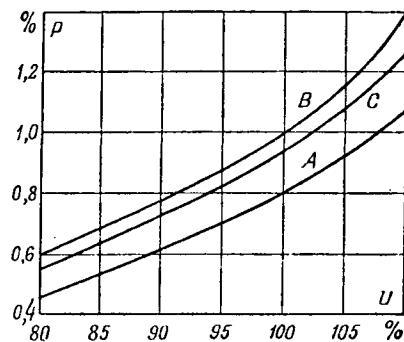


Рис. 6. Потери в стали в функции приложенного к обмотке трансформатора напряжения для различных конструкций сердечников.

$P$  — удельные потери в стали;  $U$  — напряжение, %.

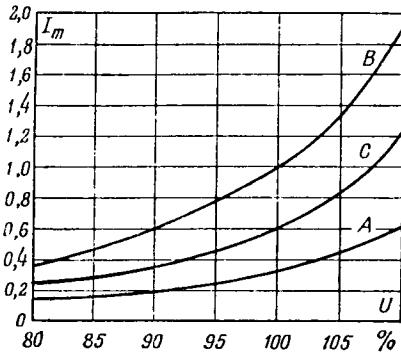


Рис. 7. Намагничивающий ток в функции приложенного к обмотке трансформатора напряжения для различных конструкций сердечников.

$I_m$  — 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 наложения обмоток отдельные полоски (слои) стали последовательно вновь пригибаются в свое окончательное положение, в котором они проходили отжиг (рис. 5, справа). Тогда, накладываемые вокруг каждой четверти сердечника, обеспечивают плотность стыков, отсутствие чрезмерных вибраций и гудения. Окончательная прессовка осуществляется с помощью вертикальных и горизонтальных сующих ярмовых балок (консолей).

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 ярника с производственной точки зрения, несомненно, имеет ряд трудностей, из которых вытекает опасность, что недостаточно тщательной сборке, связанной с отгибом полос стали, значительная часть достигнутых преиму-

ществ может быть потеряна. При этом необходимо также учитывать ремонт трансформаторов в эксплуатационных условиях, связанный со снятием обмоток.

(T. D. Gordy, G. G. Sommerville. AIEE Trans., стр. 1184, 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 привходящих 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 молний 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:

$$\text{личин: } \frac{s}{v} \text{ и } \frac{ZC}{F}.$$

На рис. 2 приведены в наиболее общем виде полученные в результате исследований отношения максимального напряжения на трансформаторе  $E$ , 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:

$$DE = \int [e(t) - K_1]^K dt,$$

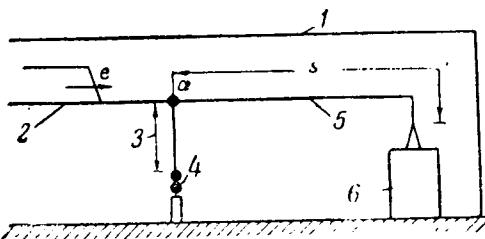


Рис. 1. Принципиальная схема, положенная в основу исследований.

1 — защитный трос; 2 — рабочий провод линии; 3 — соединительный провод между разрядником и линией или шиной; 4 — разрядник; 5 — шина; 6 — трансформатор.

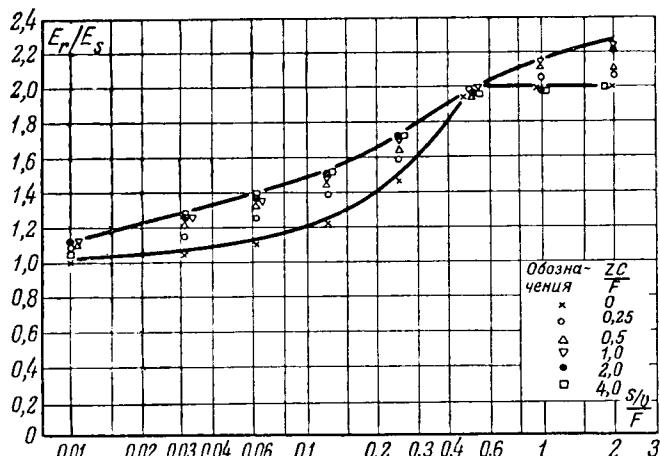


Рис. 2. Максимальное напряжение на трансформаторе.  $E_r/E_s$  — отношение максимального напряжения на трансформаторе к напряжению в месте установки разрядника.

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 линии, кВ <sub>макс</sub>		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 стационарного 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 разрядника. При определении предельно допустимых расстояний между разрядником и трансформатором в основу были положены испытательные данные трансформатора при срезанной волне и начальное пробивное напряжение искровых промежутков разрядника при волне 10/20 мксек. Крутизна набегающих волн разрядника была принята равной 1,67 кВ/м, а их амплитуда — не превышающей прочности линейной изоляции при времени разряда 3 мксек, что примерно равно времени при полной волне, увеличенной на 20%. Предел напряжение в месте установки разрядника определяется как сумма разрядного напряжения разрядника, напряжения в соединительном проводе между разрядником и шиной или линией и динамического напряжения системы (сопротивлением заземления пренебрегали). Новое сопротивление линии было принято равным 0,5 Ом.

Исходя из этих данных, были определены приведенные в табл. 1 максимально допустимые расстояния трансформаторов с полной изоляцией и в табл. 2 трансформаторов с пониженной изоляцией.

Табл.

Максимально допустимые расстояния между трансформатором и разрядником при пониженной изоляции трансформатора

Номинальное напряжение системы, кВ	Уровень изоляции линии, кВ <sub>макс</sub>	Основной уровень импульсной прочности трансформатора, кВ <sub>макс</sub>	Наибольшее допустимое напряжение рабочей частоты на разряднике, кВ	Максимально допустимое расстояние разрядник — трансформатор при длине провода между разрядником и линией	
				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 оценки разрушающего действия импульсов на изоляцию не был подтвержден никакими опытными исследованиями и может рассматриваться лишь как грубое приближение. Следует также указать, что принятые крутизны волны превышают крутизны, рекомендуемые в Руководящих указаниях по защите от перенапряжений в СССР.

(R. L. Witzke, T. J. Bliss. AIEE Trans., т. 70, ч. I, стр. 964, 1951)

Инж. А. Г. КРАУСС

## 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 20 мм и могут изготавливаться любой формы и длины; обычно до 2 м. Катоды могут быть вставлены в трубку в любом положении.

Различают два типа ламп с холодными катодами: лампы с собственно холодными катодами и лампы с оксидными холодными катодами.

Принцип работы обоих типов ламп с холодными катодами отличается от работы ламп с подогревными катодами.

Лампы с подогревными катодами. При прохождении тока через нить подогревного катода покрывающий его оксидный 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 времем около 900° С. Испускание электронов осуществляется главным образом термоэлектронным путем, и катодное падение напряжения низко. Оно составляет у прияющих типов ламп примерно 14...18 в.

Лампы при обычных длинах (до 1,5 м) зажигаются помощью сетевого напряжения. При каждом зажигании в процессе работы лампы происходит выделение из катодного пятна некоторого количества активного материала. В продолжение жизни лампы катодное пятно переносится 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 2 500 час горения при одном зажигании на каждые три часа работы. Схема включения ламп с подогревными катодами имеет особенности. Для кратковременного нагрева нити катода необходим зажигатель (стартер). Подвод тока нити накалывания осуществляется через двухштырьковые наконечники. Для получения пика напряжения при зажигании в качестве стабилизирующего устройства служит дроссель.

Лампы с собственно холодными катодами. Разряд этих ламп возникает без предварительного нагрева катодов. При наложении необходимого напряжения прямой 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 катод.

Рабочие характеристики ламп дневного света с холодными катодами приведены в таблице.

Лампы с оксидными холодными катодами. Катоды этих ламп являются как бы промежуточными между подогревными катодами и собственно холодными катодами.

Лампы с оксидными холодными катодами являются имитацией дугового разряда с номинальным током от 100 до 700 ма. Зажигание ламп происходит мгновенно благодаря высокому напряжению, получаемому с помощью зажигающего устройства, в большинстве случаев автотрансформатора.

Диаметр трубки, мм	Ток, ма	Яркость, сб	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
15	96	0,51	980	187	18,0
	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 оксидными 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 оксидные холодные катоды, обеспечивающие указанный выше срок горения ламп.

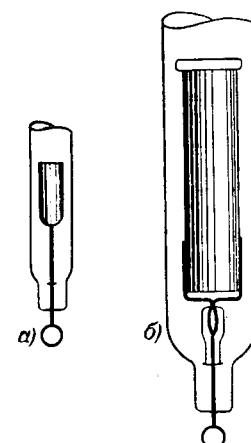


Рис. 1. Холодные катоды.  
а — для тока 15 ма; б — для тока 100 ма.

Холодный катод (рис. 1) представляет собой цилиндр, изготовленный из железа, никеля или алюминия. Размер цилиндра зависит от тока лампы. С торцевой стороны цилиндр защищен от распыления особым защитным колпачком из стекла или керамики.

Оксидные холодные катоды (рис. 2) состоят из небольшого цилиндра, изготовленного из чистого железа,

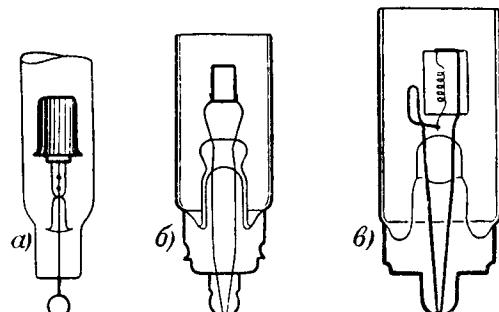


Рис. 2. Оксидные холодные катоды (200...700 ма).

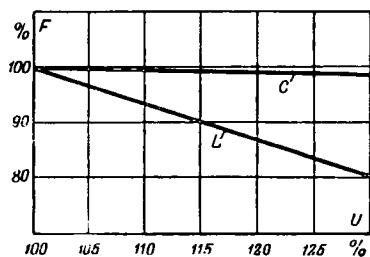


Рис. 3. Уменьшение светового потока ламп с холодными катодами при повышении напряжения в случае индуктивного и емкостного включающего устройства.

$C$ —емкость;  $L$ —индуктивность;  $U$ —начальное напряжение;  $F$ —световой поток, л.м.

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 ртути 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 параллельной 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.

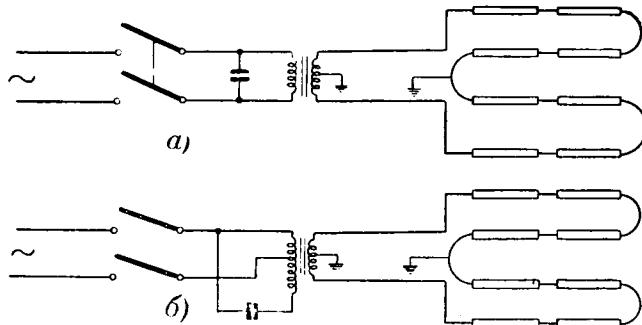


Рис. 4. Схема включения ламп с холодными катодами. а—обычное включение; б—включение с увеличенным числом витков в первичной обмотке трансформатора.

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-

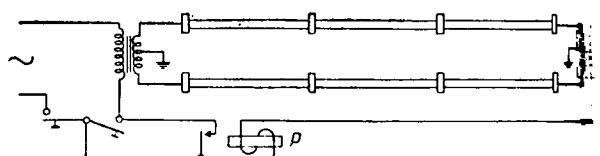


Рис. 5. Схема включения ламп с автоматическим управлением напряжения при замене ламп.  $BO$ —вспомогательная обмотка;  $P$ —реле.

ключением 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 первой цепи трансформатора при открывании крышки светильника.

Для уменьшения стробоскопического эффекта используются те же приемы, что и для ламп с подогревом 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 лампы хороши для освещения помещений, где замена ламп связана с большими трудностями, например высоких помещений фабричных и т. п.

2. В связи с возможностью изготовления ламп в различных формах и длины, а также возможностью вспаивания в трох положениях они с успехом применяются в установках декоративного освещения и для рекламы.

3. Мгновенное включение без предварительного грева 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 сырьих помещениях и в холодильниках.

5. Лампы с холодными катодами не боятся сотрясения 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 получать различные освещенности от максимума до нуля, изменяя напряжение на лампах. Такие установки удобно применять в кинозалах, демонстрационных залах и т. п.

Кроме того, светящиеся трубы с холодными катодами с успехом могут быть применены в виде источников белого цветного света для осуществления фотохимических процессов, 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.

(O. Herbstschek, E. und M., № 68, № 15/16, 1951; W. Gruber, Bulletin ASEA, № 5, 1952)

Инж. В. И. ДОЛГОПОЛОВ, инж. Н. Г. ПЕТРОВ,  
инж. Л. Н. ПОЖАЛКИН

## в строительствах крупнейших волжских ГЭС пятой пятилетки

Гигант гидротехнического строительства пятой пятилетки — Куйбышевгидрострой вступает в третий год своего строительства. 21 августа 1950 г. было опубликовано постановление правительства о строительстве Куйбышевской гэс на Волге — величайшей гидроэлектростанции Европы.

За два года строители Куйбышевской гэс выполнили главный объем подготовительных работ и сделали уже это по развертыванию основных работ; при этом установленные планы и графики строго выдерживались.

Строительство в полном разгаре. Со всех концов страны и из-за границы идут в адрес Куйбышевгидростроя машины, механизмы, материалы. Работы по строительству раскинулись на огромном пространстве за Молодецким курганом. Плотина должна быть воздвигнута от горы Молодец через Волгу и приволжскую пойму в сторону левобережного городка строителей — Комсомольска. Но не только в этом районе виден напряженный труд строителей; и в зоне от основной стройплощадки работы идут полным ходом: дорожники прокладывают новые пути, геологи проводят последние исследования, геодезисты намечают трассы гидротехнических 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 мостовым переходом через Волгу смонтировано и сдано в эксплуатацию. Проложено 162 км новых железнодорожных путей; по ним на площадку непрерывно идут по обоим берегам Волги оборудование и материалы. Железная дорога проложена к самому створу будущей плотины.

Второй год — это год широкого развертывания работ по сооружению основных гидротехнических объектов строительства. В самом русле реки, у Жигулей, завершено сооружение перемычки первой очереди котлована под электростанцию, а также перемычки вокруг котлована нижнего бьефа судоходного канала на левом берегу. Приступлено к сооружению самой протяженной третьей перемычки вокруг котлована железнобетонной водосливной плотины и котлована верхнего шлюза. Объем земляных работ 1952 г. составляет 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, независящим от погоды, от состояния дорог, требующим в 10 раз меньше рабочей силы и дающим в несколько раз темпы работы.

Вступают в строй первые мощные автоматизированные заводы на обоих берегах Волги. Тысячи тонн различных материалов будут ежесуточно поглощать эти заводы. Транспортировка материалов и некоторых видов промежуточных грузов решается здесь смело: мощная воздушная канатная дорога с одной стороны Волги движется вдоль оси банкета будущей плотины на другой. Всего на расстоянии 13 км. Около 140 стальных вышестоящих опор будут поддерживать воздушные тросы, по которым в течение всего строительства гэс будет переброшено не менее 15 000 000 т материалов. В русле реки высота опор должна достигать нескольких десятков метров.

67 км магистральных железнодорожных путей и 43 км тягостроекных 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 поступают в эксплуатацию 100 000 м<sup>2</sup> жилой площади, две больших школы, несколько детских садов, яслей, три больницы, краеведческий музей и дом отдыха).

Строительно-монтажные организации, в том числе специально созданное предприятие «Волгоэлектрострой», проводят ответственные работы по прокладке линий высоковольтной передачи Куйбышев — Москва. От Волги к Москве, параллельно от Москвы к Волге прорубаются широкие

просеки для электропередачи. На первых десятках километров трассы уже сооружаются гигантские металлические опоры.

Второй Волжский гигант — Стalingрадгидрострой развернул работы ускоренными темпами. По постановлению правительства, опубликованному 31 августа 1950 г., Стalingрадская 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 позволяют и в 1952 г. перевыполнить установленный Стalingрадгидростроем 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 Стalingрадгидростроя. 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 Стalingрадгидрострое широко развернулось социалистическое соревнование в честь XIX съезда коммунистической партии. Опубликованный проект директив съезда по пятому пятилетнему плану вызвал в коллективах крупнейших волжских энергетических строительств новый 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 Стalingрадской 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 Стalingрадгидрострое, 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 хозяйствственные 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 Куйбышевгидростроя и Стalingрадгидростроя, 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 поменяние декларативных заявлений и побольше действительной и своевременной помощи.

Д. Р.

## 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 проводят МОНИТОЭ по оказанию помощи великим стройкам коммунизма. Как на одном из примеров конкретной помощи, академик М. В. Кирпичев остановился на внедрении ручной электросварки высокоеффективными электродами из порошковой стали на площадке Куйбышевгидростроя. 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 инженеров Московской проектной конторы Гидростроя Я. Н. Ветухновский, отметивший, что в создании немалую роль сыграло первичное отделение инженерного общества, способствовавшее решению вопросов и оказавшее помощь конструкторам.

Члены коллектива энергетиков первичного отделения Общества при автозаводе имени Сталина М. М. Третьяк, А. С. Тихомиров демонстрировали на пленуме запроектированный и изготовленный ими опорный оригинальный ротор электрических импульсов, который позволяет в широких пределах менять частоту механических вибраций. Эту установку коллектив выполнил заслуженное социалистическое обязательство в память великим стройкам. Устройство найдет широкое применение в производстве вибрационных машин на гидростроительствах при забивке свай и шпунтов и т. д.

За разработку и внедрение новой техники и технологии 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. Барабанов, 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, экскаваторщики 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 граждены многие строители — передовики социалистического соревнования на Волго-Доне. В их числе талантливые строители и монтажники Цимлянской гидроэлектростанции, инженеры и рабочие электропромышленности, смело отвергнувшие 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 ветских 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 предположения 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 усилении 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 отделениями за работу первичных организаций, особенно находящихся на периферии, затяжка с созданием первичных организаций, Мингечаургэсстроя и др.

Азербайджанское отделение ВНИТОЭ провело для участников совещания экскурсию в город Мингечаур, строительство Мингечаурского гидроузла.

Инж. И. М. ПЕТРОВ

Баку

# Биография

## Электроснабжение промышленных предприятий

Примерно 5/7 всей электроэнергии, вырабатываемой в СССР, потребляют промышленные предприятия. Одно это уже определяет особенную важность задачи оптимального электроиспользования и электроснабжения промышленных предприятий. Решение 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, Гизлэгпром, 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

Ростовского ПКУ треста Кавэлектромонтаж

Содержание книги А. А. Федорова и Б. А. Князевского по моему мнению, не соответствует ее названию. Задача электроснабжения предприятия значит и наиболее целесообразную систему электрических устройств, обеспечивающую потребителей предприятия не иной электроэнергией. В зависимости от конкретных условий электроснабжение предприятия может быть решено различным образом.

Для того чтобы составить систему электроснабжения, нужно 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, избором конкретных примеров, показывающих для наиболее характерных случаев решается электроснабжение 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, что, как они влияют на технико-экономические показатели системы электроснабжения, — этого в книге нет. Прочитав названную книгу, студенты энергетических и электротехнических учебных заведений и факультетов (которых написана книга), по существу за небольшим исключением, повторят лишь то, что им должно быть дано из других курсов (сетей, подстанций, электроэнергии и т. д.). Не больше пользы она принесет и инженерно-техническим работникам, занимающимся электроснабжением.

Из книги по электроснабжению читатели должны знать: не формулы по расчету токов короткого замыкания, как величина токов короткого замыкания влияет на электроснабжение; не описание аппаратов, применение которых и где их применить; не общее описание

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, имеющейся 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.

Ряд недостатков и упущений необходимо учесть автором 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 напряжении».

2. В книге дан расчет токов короткого замыкания только в установках напряжением до 1 000 в. Мне ка-

жется, необходимо дополнить главу II расчетом токов короткого замыкания в установках напряжением выше 1 000 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. Этую 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 более 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 наивыгоднейшей 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 возврений 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 выбиравшего 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 действие потребителя электроэнергией высокого качества минимальных расходах на это.

На стр. 17 написано «из выражения (1-1) легко получить величину расчетной мощности, выраженную  $P_v$  (установленную мощность) и  $K_c$  (коэффициент с). Авторы были бы правы относительно легкости деления  $P_p$ , если бы было нужно сделать только арифметических действий над известными ми. Однако дело обстоит совсем иначе. Как раз трудно определить достоверную величину коэффициента спроса. Это, в противоречие самим себе, впрочем, чают и сами авторы на стр. 20, указывая, что «значение коэффициентов  $C$  и  $B$  (коэффициентов, характеризующих степень использования электродвигателей и т. д. в величину коэффициента спроса —  $C, P$ ) для различных отраслей промышленности — задача весьма сложная, требующая трудоемкой работы». Следовало бы сказать, — а главное хорошего знания производства, 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, разработка химического движения влияет на изменение коэффициента спроса.

Совсем непонятно утверждение авторов, что «значение коэффициента спроса для любого предприятия нетрудно как отнести 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, Харфуса) за новые методы производства (сугубые и новые графики) не влияют на характер потребления электроэнергии?

На стр. 33 авторы особо подчеркивают, что собственные электростанции (надо полагать, советских производственных предприятий) имеют, как правило, маломощные генераторы. Во-первых, это просто неверно. Авторы могут не знать о весьма больших мощностях собственных электроподстанций предприятий, например металлургической или химической промышленности. Во-вторых, электростанции промышленных предприятий всегда работают параллельно с районной сетью. Некоторое количество уцелевших автономных заводских электростанций является примером устаревшей, уходящей в прошлое тенденции ориентации учащихся на эти станции нецелесообразно.

На стр. 37 авторы указывают: «рассматривая кривые нагрузок, выбираемые варианты размещения Г.П.П., подстанций и схемы электроснабжения предприятия, легко оценить целесообразность выбора любых намеченных вариантов и принять на основании тех экономических показателей окончательное решение по этим вопросам». Что этот выбор сделает совсем не ясно. Наоборот, трудно, доказывают неоднократные неудачные решения электроснабжения предприятий. Они 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 капиталовложений? Минимум потерь энергии? Минимум ежегодных расходов? А как предлагают авторы оценивать надежность устройства, необходимость которого авторы отмечают на стр. 37. Как учитывать ширение производства? Сколько вариантов надо оценить, чтобы правильно решить вопрос электроснабжения и как можно гарантировать, что в число рассматриваемых вариантов вошел также и наилучший из всех? Указ 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 рассечению проводов по нагреву и по потере напряжения, борьбе системы защиты и аппаратов. Этот материал и прямое отношение к курсу электрических сетей. В значительно более полном и лучшем виде он изложен в кандидатской диссертации проф. А. Я. Рябкова. К тому же он не имеет прямого отношения к электроснабжению, так как не определяет собой 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 по электроснабжению. Рекомендации по группировке приводителей даны с точки зрения электрика, полагающего возможным подчинить нужды производства электротехническим целям. Так, например, на стр. 43 сказано, что способ группировки потребителей rationalен с точки зрения использования сети низкого напряжения».

Достоинством радиальной системы питания потребителей авторы считают отсутствие влияния повреждения в токоприемнике или питающей линии на питание того. Это верно, если стоять на точке зрения чистого прика, не учитывающего особенностей производства. действительно при современных поточных способах производства останов одного из электродвигателей и, следственно, связанной с ним машины неминуемо должен останов и всех остальных машин и электродвигателей потока. Случай, указанные авторами, единичны и характерны для советского поточного производства. В главе III рассмотрены различные схемы распределения электроэнергии на высоком напряжении. Отведен для этого объем материала, однако, очень мал, и не понятно, что авторы уделили различным схемам только общее внимание. Аналогичный материал во второй раз более 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 перепику таблиц № 1 и № 3 из книги Славнина. Причина такого 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 схем питания различных потребителей. Авторы, например, на стр. 118 указывают, что «потребители 2 категории могут иметь один-два источника питания. В этом же вопросе о числе источников питания решается конечно 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 этот вопрос электроснабжения по собственному разумению.

Авторы далее указывают, что «схемы распределения электрической энергии на высоком напряжении по прошленному предприятию в системе внутреннего электроснабжения различаются в зависимости от конкретных условий, как то: необходимой степени надежности питания предприятия или отдельных его цехов, графика рабочего производства, перспективы дальнейшего развития и перспективы производства, сезонности работы и т. д.» Это именно конкретности данных не хватает в этом самом правильном совете. Учащийся не получает никаких сведений, позволяющих ему решить, когда и какую из перспектив электроснабжения при различных планах расширения 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, 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 разные по одному варианту могут быть или больше, или меньше, чем по другому варианту (стр. 145). Авторы все же признают, что выбор схемы, выбор напряжения, вообще всех элементов электроснабжения и могут быть сделаны «с учетом специфической енности данного производственного предприятия». Трудно, 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 растирачивается время учащегося на повторение. Все чертежи защищены, компоновок и разрезов можно найти в книгах А. Г. Глазунова, Л. Н. Баптиданова и В. И. Тарасова и др.

Глава VI, в которой изложены расчет 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 связи 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 выдвинуть эту основу, то отдельные элементы, лишенные общей связи, рассыпаются и курс получается эклектическим собиранием 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 грактовка 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 замечание относится, 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, комбинированную нагрузку, т. е. сумму нагрузок более приемников с неодинаковыми графиками, вопрос часто возникает в практике.

Обе книги не касаются вопроса о наименьшей структивно выполнимой мощности асинхронного двигателя для данного напряжения и об экономической границе приемников низкого и высокого напряжения. Всем этого выпадает важная часть методики компоновки и читатель не получает указаний о том, как следить за двигателем,—непосредственно на высокое напряжение или на низкое, присоединяя его через соответствующий понизительный трансформатор.

Авторы обеих книг почему-то не отмечают тенденцию в практике крупных заводов к переходу на напряжение сети электроснабжения  $11 \text{ кв} \approx \sqrt{3} \cdot 6,3 \text{ кв}$ , вызванную стом мощностей отдельных приемников (прокатные станов и протяженности заводских сетей).

В обеих книгах вопросы повышения коэффициента мощности рассматриваются, исходя из постоянной нагрузки, питающей устройства в случае резко переменного графика нагрузки. Не разъясняется связь между стартовой загрузкой асинхронного двигателя и величиной начальной загрузки для этой загрузки напряжения, позволяющей сохранить почти номинальное значение коэффициента мощности двигателя. Вообще, здесь уместно было бы привести своеобразные характеристики тока статора асинхронного двигателя при постоянной нагрузке на его статор 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 современных предприятиях значительное протяжение. Большое значение имеет вопрос выбора напряжения для цепей управления, особенно в связи с «емкостным эффектом».

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 сеть, 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 обогатил энтузиастов 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, повидиму, 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.