



ИЗ КОНСТИТУЦИИ СОЮЗА ССР

Ст. 118. Граждане СССР имеют право на труд, то есть право на получение гарантированной работы с оплатой их труда в соответствии с его количеством и качеством...

Ст. 119. Граждане СССР имеют право на отдых...

Ст. 120. Граждане СССР имеют право на материальное обеспечение в старости, а также в случае болезни и потери трудоспособности...

Ст. 121. Граждане СССР имеют право на образование...

Ст. 122. Женщине в СССР предоставляются равные права с мужчиной во всех областях хозяйственной, государственной, культурной и общественно-политической жизни...

Ст. 133. Защита отечества есть священный долг каждого гражданина СССР

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

22

1937

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ГОД ИЗДАНИЯ 58-й

22
1937
НОЯБРЬ

ГЛАВЭНЕРГОПРОМА, ГЛАВЭНЕРГО НКТП И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА АКАДЕМИИ НАУК СССР
редакции: Москва. Бол. Калужская, дом 67. Энергетический ин-т, 1 этаж, ком. 144, тел. В 5-32-79
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
12 декабря 1937 года	2
Янус Р. И. — О стандарте на листовую электротехническую сталь	3
Плюсчин К. Л. — Низковольтная замкнутая сетка в Московской кабельной электросети	7
Суслов М. П. — Автоматические гидроэлектростанции без регулятора скорости	14
Ходоренко А. С. — Малорелейная система телеуправления	17
Вальтер И. М. — О скорости восстановления напряжения на контактах выключателей	22
Буйлов А. Я. — Распределение напряжения между отдельными разрывами выключателя	24
Городецкий П. Г. — Поведение индуктивного потребителя и компенсация сдвига фаз при несинусоидальном напряжении	27
Бенедикт О. В. — О магнитной индукции в любой точке зубцового деления электрических машин	29
Гейлер Л. Б. — Новая формула для расчета электропривода с маховыми массами	34
Тареев Б. М. — О величине $\operatorname{tg} \delta$ низковольтных электроизоляционных материалов	36
Стекольников И. С. Международная конференция по крупным электросистемам высокого напряжения	37
Радовский М. И. — Б. С. Якоби и его работы над проблемой электродвигателя	45

О ДНЕ ВЫБОРОВ В ВЕРХОВНЫЙ СОВЕТ СССР

Постановление Центрального Исполнительного Комитета
СССР

На основании постановления Чрезвычайного VIII Съезда Советов и ст. 72 „Положения о выборах в Верховный Совет СССР“ об установлении дня выборов в Верховный Совет СССР не позднее, чем за два месяца до срока выборов и в нерабочий день, Центральный Исполнительный Комитет СССР постановляет:

1. Назначить выборы в Верховный Совет СССР на 12 декабря 1937 года.
2. Объявить начало избирательной кампании по выборам в Верховный Совет СССР с 12 октября 1937 года.

Председатель Центрального Исполнительного
Комитета СССР М. КАЛИНИН

За Секретаря Центрального Исполнительного Комитета СССР
Член Президиума ЦИК СССР А. АНДРЕЕВ
Москва, Кремль. 11 октября 1937 г.

12 декабря 1937 г.

БЛИЗИТСЯ 12 декабря 1937 г.

Этот день — день выборов в Верховный Совет СССР на основе Сталинской Конституции — войдет в сознание народов Союза, как радостный праздник, подводящий замечательные итоги борьбы и побед за 20 лет Великой Октябрьской Социалистической революции.

По всей стране широко развернулась избирательная кампания, демонстрируя всему миру огромный подъем советского патриотизма, могучее единство и сплоченность трудящихся вокруг партии Ленина — Сталина, горячую любовь к вождю и учителю, родному товарищу Сталину.

Многотысячное собрание рабочих, инженерно-технических работников и служащих московского «ЭлектроКомбината» им. Куйбышева выдвинуло кандидатом в депутаты Верховного Совета по Сталинскому избирательному округу товарища Сталина. Вслед за «ЭлектроКомбинатом» другие заводы, фабрики, колхозы на всенародных собраниях повсеместно называют товарища Сталина первым кандидатом в депутаты Верховного Совета. Кандидатами в депутаты выдвинуты ближайшие соратники товарища Сталина: Молотов, Каганович, Ворошилов, Калинин, Андреев, Микоян, Чубарь, Жданов, Ежов.

Наряду с руководителями партии предвыборные собрания выдвигают людей, выросших вместе со всей страной в эпоху героических сталинских пятилеток. Эти люди — Чкалов, Молоков, Громов, Пичугина, Сметанин, Симонженкова, изумительная биография которых теснейшим образом сплетена с Октябрем и победоносным строительством социализма.

К выборам Верховного Совета страна приходит со списком величайших побед во всех областях жизни, хозяйства, культуры, науки и техники.

На примере развития и роста электрификации, взращенной Лениным и Сталиным, мы видим стремительный ход социалистической индустриализации и реконструкции страны.

От 1,1 млн. kW мощности электростанций и 1,9 млрд. kWh выработки электроэнергии в 1913 г. — к 7,5 млн. kW и 32,8 млрд. kWh в 1936 г.

Необычайно выросла и новая техническая интелигенция, всеми корнями своей жизни связанная с трудовыми массами. В 1925 г. во всей промыш-

ленности было 62 тыс. инженерно-технических работников, в 1928 г. их численность доходила до 92 тыс. чел., а в 1937 г. в советской промышленности работает 578 тыс. инженеров и техников.

Октябрьская революция вызвала к жизни Верховскую гидроэлектростанцию, строительство которой, озаренное заревом гражданской войны, направляло Ленин.

Октябрьская революция вызвала к жизни ДнепроГЭС, СвирьГЭС и десятки мощных теплоэлектроцентралей, построенные в годы сталинского пятилеток.

Теперь советская страна дерзает построить уже начала строить наиболее грандиозные в мире гидроэлектростанции Куйбышевского узла. В отрогах Жигулевских гор могучее течение Волги большевики преградят гигантской плотиной, чтобы дать орошение засушливым полям Поволжья и вные миллиарды киловатт-часов нашей промышленности.

Идя к знаменательной дате 12 декабря 1937 г., отряд работников советского электрохозяйства и электропромышленности должен направить усилия к еще большему укреплению мощи социалистической электроэнергетики.

Последствия контрреволюционного вредительства троцкистско-бухаринских агентов фашизма в электроэнергетике полностью не ликвидированы. На работе электростанций — это виднее всего. План строительства электростанций и ввода новых мощностей за 10 мес. 1937 г. не выполнен. Вместо резервов мощностей мы имеем в некоторых районах энергосистемах дефицит мощностей. Аварии в электрохозяйстве не изжиты, последствия их попрежнему тяжело отражаются на промышленности.

Стахановцы и ударники электропромышленности и электрохозяйства должны ознаменовать двадцатилетие Великой Октябрьской Социалистической революции и выборы в Верховный Совет Союза упорной работой по ликвидации последствий вредительства, борьбой за высокий уровень советской электроэнергетики.

Вместе со всеми трудящимися рабочие, инженеры, научные работники и служащие электропромышленности и электрохозяйства на выборах в Верховный Совет продемонстрируют свою преданность партии Ленина — Сталина и делу социализма.

О стандарте на листовую электротехническую сталь

Р. И. Янус

Уральский физико-технический институт

ДЕЙСТВУЮЩИЙ сейчас общесоюзный стандарт (ОСТ) на листовую электротехническую сталь принципе повторяет устарелые «Нормы германского союза инженеров», родившиеся на основе военной германской техники и экономики и совершенно не соответствующие высоким требованиям электропромышленности СССР.

Если даже современная металлургия еще часто не удается указать способы получения в выплавляемой стали требуемых магнитных свойств на определенном участке кривой намагничивания, то время составления германских «Норм» положение было еще значительно хуже. О какой-нибудь дифференциации и специализации магнитных свойств стали применительно к дифференцированным условиям работы электромагнитных механизмов могли быть лишь самые примитивные представления. Да и электропромышленность того времени в виде сравнительно мелких (по нашим масштабам) предприятий с универсальной номенклатурой, выпускаемой в полукустарном порядке электроаппаратуры, мало стимулировала специализацию стали. Более подходила сталь «хорошая вообще», т. е. такая, которая как-то годилась для любого аппарата, хотя в каждом частном случае она оказывалась несколько хуже, чем сталь, специализированная именно для данного типа аппаратуры.

В результате наш ОСТ 3890, почти повторивший германские «Нормы», отразил в себе следующие основные принципы:

1. Было установлено минимальное количество различных марок электротехнической стали (всего три); в этих марках задавался в первую очередь химический состав (процент кремния) и лишь во вторую очередь как бы в порядке примечания — целевое назначение данной марки, причем последнее в самой неопределенной форме.

2. Для характеристики магнитных свойств стали было зафиксировано определенное, довольно большое количество точек (B_{25}^0 , B_{50}^0 , B_{100}^0 , B_{300}^0 , V_{10} , V_{15}), подлежащих измерению совершенно одинаковым образом в пробах, составляемых также по совершенно одинаковому рецепту из стали любой марки независимо от ее целевого назначения. Возможности каких-либо иных испытаний, иных показателей не предусматривалось.

3. При выборе методики измерения было оказано резкое предпочтение таким способам, которые дают наиболее устойчивые показатели, хотя для этого пришлось частично отказаться от непосредственного измерения технически важных свойств материала и оценивать их по весьма косвенным показателям (например в стали для трансформаторов вместо непосредственного измерения при определенных условиях эффективной силы намагничающего тока — установлено измерение индукции в нескольких точках так называемой

Вологодская областная универсальная научная библиотека

основной кривой намагничивания в угоду устойчивости получаемых таким образом чисел).

В 1934 г. ОСТ 3890 был заменен новым ОСТ 6391. Последний немногим отличается от своего предшественника: число допущенных марок сталей увеличено до восьми, а требования к качеству стали несколько повышены. Принцип классификации стали по маркам остался прежний, магнитные характеристики и методы испытаний — также.

В ОСТ 6391 мы не находим ни намека на магнитные испытания, могущие как-то характеризовать пригодность какой-либо из перечисленных там марок стали для нужд электропромышленности. В результате этого естественными и неизбежными являются, например, постоянные жалобы наших заводов на неудовлетворительное качество той стали, которую они получают, хотя эта сталь прекрасно укладывается в ОСТ 6391. Даже более того, сталь марки ЕС4А («лучшего качества») для некоторых изделий (измерительные трансформаторы) часто оказывается значительно хуже, чем марка ЕС4 («нормального качества»), хотя стоимость первой значительно выше. В аналогичном «беспризорном» положении находится вся радиопромышленность: отгружаемая сталь, контролируемая по ОСТ 6391, по существу никакому контролю на свойства в слабых полях (а только они и интересны в данном случае) не подвергается. Даже потребности современной сильноточной промышленности уже не могут быть отражены с достаточной строгостью в унифицированных шести магнитных показателях.

Наша металлургия гигантски опередила довоенную. Благодаря большой работе физиков и металлургов «секреты» магнитных свойств стали на отдельных участках кривой намагничивания уже поддаются некоторой расшифровке и сознательной регулировке.

Наш поставщик листовой электротехнической стали — Верх-Исетский metallургический завод — уже может ити навстречу дифференцированным потребностям электропромышленности, но делает это довольно вяло потому, что сама электропромышленность робко предъявляет новые требования. В результате этого внедрение в наше производство последних достижений науки и техники, «не предусмотренных» ОСТ, идет чрезвычайно медленно. Такое положение необходимо решительно изменить.

Как нужно изменить стандарт на листовую электротехническую сталь для того, чтобы он гораздо эффективнее, чем сейчас, содействовал подъему нашей электропромышленности на новую качественную ступень?

Мне представляются необходимыми следующие изменения:

1. В основу классификации стали по маркам должно быть положено **целевое назначение** каждой

дой марки. Вопрос о химическом составе и тому подобные подробности могут играть лишь подчиненную роль.

2. Каждая отрасль нашей электропромышленности, потребляющая сколько-нибудь значительное количество стали, должна получить *свою специальную марку* стали, наилучшим образом отвечающую ее запросам. Пусть на первых порах некоторые марки будут фактически очень близки друг к другу или даже совпадать. Польза введения в стандарт различных марок будет в таких случаях заключаться в том, что перед металлургами будут поставлены на будущее ясно очерченные задачи, выполнение которых будет каждодневно контролироваться по качеству отгружаемой стали данной марки. Это заставит металлургов использовать все имеющиеся и открывающиеся способы влияния на качество стали в заданных точно зафиксированных направлениях. В результате этого соответствующие отрасли промышленности в очень недалеком будущем смогут получить сталь, удовлетворяющую их запросам в гораздо большей степени, чем нынешние чрезмерно универсальные марки стали.

3. Для каждой марки стали в строгом соответствии с ее целевым назначением должны быть установлены *свои индивидуальные характеристики, свои нормы и свои методы испытания*. Это потребует некоторого увеличения измерительной аппаратуры в испытательных лабораториях, в некоторых случаях даже разработки новых измерительных методов, но эти затраты будут очень быстро окуплены полученными результатами.

4. При выборе измерительных методов следует давать предпочтение тем, которые дают с наибольшей возможной точностью величину, непосредственно интересующую технику, а не ее суррогат. Кажущаяся точность или устойчивость косвенных, суррогатных характеристик в наших условиях лишь вредна, так как может ввести недостаточно искущенных работников в заблуждение и создать иллюзию благополучия там, где его на самом деле нет.

5. Для каждой марки должны быть зафиксированы лишь те испытания, которые совершенно необходимы для характеристики применимости данного материала по его прямому назначению. Лишние испытания, производимые «на всякий случай», должны быть из стандарта решительно устраниены, так как, помимо совершенно ненужной загрузки измерительной аппаратуры и работников, они отвлекают внимание людей от главных вопросов. Для большинства марок сталей совершенно достаточно контролировать систематически лишь одну-две-три магнитные величины вместо шести, полагающихся по ОСТ 6391.

Вопрос о том, какие именно отрасли электропромышленности должны быть отражены в новом стандарте через специальные марки стали, требует очень серьезного и детального обсуждения. Повидимому, общее число требующихся сейчас марок электротехнических сталей окажется не очень большим — во всяком случае ниже 20.

Например, первые 4 марки ОСТ 6391 могут, вероятно, остаться при их существующем целевом назначении (§ 1, п. «а» ОСТ 6391 рекомендует марку ЕС1 для электрических моторов и

генераторов в магнитных цепях, питаемых постоянным током, или в слабо нагруженных магнитных цепях переменного тока; марку ЕС1А — для нормальных, каталожных, электрических моторов и генераторов; ЕС1АА — для электрических моторов генераторов специального назначения; ЕС2А — для магнита). Но остальные 4 марки ОСТ 6391 (ЕС3А, ЕС4, ЕС4А, ЕС4АА) представляют собой случайное искусственное объединение чрезвычайно разнообразных противоречивых требований и должны быть разукрупнены. В самом деле никакая металлургия не дает, и, повидимому, не сможет дать стали, которая одновременно обладала бы наилучшими качествами для трансформаторов звонковых, слаботочных, котельных, сварочных; турбогенераторов мощностью до 5000 kW (рекомендуемое применение марки ЕС4) или для силовых трансформаторов мощностью 320 и 560 kVA и выше 5600 kVA; для измерительных трансформаторов (марка ЕС4АА). Получение в стали для столь универсальных целей сколько-нибудь резкого повышения качества по всем необходимым характеристикам является чрезвычайно сложной задачей, для решения которой насегодня еще не видно никаких определенных путей. Гораздо скорее и вернее можно добиться успеха через расчленение этой задачи на ряд более узких, поддающихся непосредственному решению.

Современные представления о природе электромагнитных процессов существенно различают элементарные причины следующих магнитных свойств:

1. Очень высокая начальная проницаемость при отсутствии подмагничивающего поля, — этим свойством должны обладать стали для входных радиотехнических трансформаторов, магнитных экранов и т. д.

2. Высокая, устойчивая начальная проницаемость при наличии подмагничивающего поля, это необходимо в межламповых трансформаторах усилителей некоторых типов, в измерительных трансформаторах тока и т. д.

3. Устойчивая проницаемость вплоть до средних индукций, существенна для выходных трансформаторов в мощных усилителях.

4. Высокая проницаемость при индукциях до 10 000 G, — необходима в малых силовых трансформаторах типа радиотехнических и звонковых и в измерительных трансформаторах напряжения.

5. Малые потери энергии (на гистерезис и токи Фуко) при умеренной проницаемости в переменных полях технической частоты в области индукций 12 000 — 14 000 G, — обязательное свойство стали для нормальных силовых трансформаторов.

6. Уменьшенные потери энергии при средних индукциях в полях высокой частоты, — такова должна быть сталь для мощных высокочастотных машин и трансформаторов.

7. Высокая проницаемость при индукциях 15 000 — 18 000 G при умеренных потерях энергии.

8. Высокое магнитное насыщение.

Различие в причинах, обусловливающих те или иные свойства, обусловливает и разницу в средствах, ведущих к получению этих свойств. Например, для получения очень высокой начальной проницаемости — свойства, указанного в п. 1, достаточно взять сплав железа с 50 — 80% никеля (гайперник — пермаллон). Но эти сплавы лишь

большой натяжкой пригодны для каких-либо стальных целей. Например, по пп. 2, 7 и 8 даже простое кровельное железо окажется значительно лучше.

Очень высокие требования к качеству материала для наиболее ходовых и ответственных агрегатов, оказывающих наибольшее влияние на энергохозяйство страны — для силовых трансформаторов, генераторов и крупных электродвигателей, — оправдывают дальнейшую дифференциацию стали по свойствам. Например, вместо одной марки стали соответственно п. 5 будет, повидимому, целесообразно иметь две отдельные марки: одну — для так называемых распределительных трансформаторов с рабочей индукцией 12 000—13 000 G и другую — для мощных станционных трансформаторов с рабочей индукцией 13 000—14 000 G. Вследствие очень большой эффективности действительного снижения потерь энергии в изделиях этого типа даже на весьма малую величину — такая дифференциация требований и соответственная специализация контроля выполнения этих требований, безусловно, оправдывается. То же по пп. 7 и 8 применительно к моторам и генераторам различных мощностей с различными условиями работы и т. д.

ОСТ 6391 знает лишь шесть универсальных магнитных характеристик стали: V_{10} , V_{15} , B^{25} , B^{50} , B^{100} , B^{300} . Все эти величины определяются в так называемых эпштейновских пробах весом по 10 kg, набранных из полосок стандартного размера 500 × 300 mm, причем одна половина этих полосок вырезывается из пробных листов стали вдоль направления прокатки и вторая — поперек.

Может ли такой универсализм удовлетворить разносторонние требования современной электропромышленности? Приведу лишь несколько примеров.

Хорошо известно, что магнитная проницаемость и гистерезис в листовой стали при намагничивании ее вдоль направления прокатки существенно отличаются от тех же свойств при поперечном направлении намагничивания. В первом случае свойства значительно лучше, чем во втором. Эпштейновские пробы вследствие способа их составления усредняют свойства относительно обоих этих направлений. Примерно это и требуется техникой в тех изделиях, в которых магнитный поток имеет всевозможные ориентации относительно материала магнитопровода, например, в статорах и роторах небольших генераторов и двигателей, собираемых из целых штампованных колец.

Но там, где магнитопровод собирается из отдельных сегментов или прямоугольников, их всегда вырезывают так, чтобы магнитный поток был направлен по возможности только вдоль прокатки. Вследствие этого во всех силовых трансформаторах, в статорах крупных генераторов и т. д. поперечное направление потока почти полностью отсутствует. Нужно ли в таких случаях (а фактически такие «случаи» поглощают почти всю выпускаемую трансформаторную сталь и значительную долю динамной) усреднять измеримые свойства стали между продольным и поперечным направлением? Это усреднение вредило бы сравнительно немного, если бы между

свойствами стали вдоль и поперек прокатки существовало какое-то вполне постоянное соотношение. Тогда путем соответствующего пересчета можно было бы во всех нужных случаях уверенно рассчитать по средним свойствам также и свойства вдоль прокатки. Но фактически эта разница колеблется совершенно случайным, незакономерным образом от партии к партии, от листа к листу.

Между тем потребители стали очень энергично отстаивают каждую сотую ватта снижения потерь, каждый десяток гауссов повышения индукции, так как они имеют серьезное практическое значение, а необоснованное усреднение оставляет вне контроля гораздо большие случайные величины. Ясно, что пробы для испытания материала, применяемого только вдоль прокатки, нужно набирать также исключительно вдоль этого же направления, лишь тогда испытание будет показывать то, что действительно нужно для практики.

Далее. Испытание на потери энергии предусматривается во всех марках стали при индукциях 10 000 и 15 000 G (точки V_{10} и V_{15}), между тем магнитопроводы генераторов и двигателей работают при гораздо более высоких индукциях вплоть до 18 000 G (в зубцах). Так как при увеличении индукции потери очень быстро растут, то ясно, что применимость какой-либо партии динамной стали может быть лимитирована только потерями при индукциях 15 000—17 000 G и выше, и измерять в ней V_{10} вообще не имеет никакого смысла, а вместо V_{15} будет, вероятно, целесообразнее ввести измерение V_{16} или V_{17} .

Еще пример. Почти все силовые трансформаторы работают в интервале индукций 12 000—14 000 G, причем для каждой серии трансформаторов уже при ее конструировании задается вполне определенная рабочая индукция, отступления от которой в процессе эксплуатации ограничены теми же очень узкими пределами, как и колебания в подводимом к трансформатору напряжении. Следовательно, пригодность какой-либо партии стали для сборки трансформатора заданной серии определяется величиной потерь при какой-то определенной индукции в интервале 12 000—14 000 G.

Для определения этой величины по заданным значениям V_{10} и V_{15} неминуемо придется прибегнуть к интерполяции. Так как закон зависимости потерь от индукции в точном виде неизвестен и предложенные до сих пор простейшие эмпирические формулы (Штейнметца, Рихтера и др.) универсального характера не имеют, то при таком интерполировании всегда возможна серьезная разница между действительной величиной потерь и найденной через интерполирование. Эта возможная разница тем больше, чем дальше отстоит рабочая индукция от индукций испытания и, следовательно, она достигает максимума при индукциях 12 000—13 000 G, т. е. как раз для наиболее употребительных значений индукций.

Для уменьшения этой разницы нужно по возможности приблизить индукции испытания к рабочей индукции. Например, если будем вести испытание при 13 000 G, то рабочая индукция будет отстоять от испытательной не больше чем на 1000 G.

Можно показать, что при этом уже вполне применима формула

$$V_B = V_{B_0} \left[1 + \frac{2(B - B_0)}{B_0} \right]. \quad (1)$$

Для практического применения этой формулы достаточно измерить лишь одну величину (V_{B_0}). Эта формула равносильна утверждению, что потери растут примерно пропорционально квадрату индукции. Для $12000 \leq B \leq 14000$ и $B_0 = 13000$ Гц рассчитанные по (1) значения потерь отличаются от истинных не больше чем на 2–3%, т. е. на величину порядка возможной погрешности измерений. Любые интерполяционные формулы, опирающиеся на две измеренные величинами V_{10} и V_{15} , дают для промежуточных точек возможную погрешность такого же порядка (или больше), т. е. измерение двух величин (V_{10} и V_{15}) никаких практических преимуществ по сравнению с измерением одной величины (V_{13}) не дает. Недостаток же применения двух характеристик вместо одной — не только в большей затрате рабочей силы на измерения, но и в затруднениях при ориентировочной оценке пригодности материала для данного типа изделий. Пусть у данной партии стали V_{10} значительно больше нормы, а V_{15} значительно меньше, и приемщику предстоит решить вопрос: принять или не принять эту партию стали. Для правильного решения этого вопроса приемщику нужно знать, каковы будут потери в этой партии стали при ее рабочей индукции. Интерполяция по сложным формулам в таких случаях практически не применяется, и то или иное решение поставленного вопроса принимается в зависимости от весьма случайных обстоятельств. Одна величина V_{13} позволила бы в данном случае гораздо быстрее ориентироваться в технической пригодности этого материала и характеризовала бы действительное качество его гораздо непосредственнее.

Еще более непосредственную характеристику качества можно получить, приблизив индукцию испытания к рабочей. Для этого пришлось бы сталь для так называемых распределительных трансформаторов, работающих в интервале индукций 12 000–13 000 Гц, испытывать при индукции 12 500 Гц, а сталь для мощных станционных трансформаторов при индукции 14 000 Гц и т. д. Это не вносило бы никакой особой путаницы, так как на трансформаторы первого типа идет обычно сталь формата 1500×750 мм (или меньше), а на второй тип — формата 2000×1000 мм или 2000×750 мм; материал второго, большего формата, значительно дороже, чем первый, и на практике никогда с ним не смешивается и его не заменяет.

Совершенно неудовлетворительно поставлен контроль стали для слаботочной промышленности.

Настойчивые попытки найти какую-либо количественную связь между V_{10} , B^{25} и тому подобными «стандартными» характеристиками и проницаемостью в слабых полях ни к какому положительному результату до сих пор не привели¹.

Повидимому, такой связи в сколько-нибудь определенном количественном виде и не существует. Поэтому измерение в стали, предназначаемой для слаботочной промышленности, величин V_{10} и т. д. является по существу вредным самообманом, иллюзией какого-то контроля при фактическом отсутствии его.

Действительный же контроль может быть установлен лишь по совершенно иным показателям.

Особняком нужно поставить вопрос о характеристике магнитной проницаемости стали. Сейчас испытания состоят в измерении индукции при фиксированных величинах статического намагничивающего поля (значения B^{25} , B^{50} , B^{100} , B^{200} , измеряемые при полях соответственно в 25, 50, 100 и 300 ампервитков). Такой порядок был вполне естественным тогда, когда единственным сколько-нибудь удовлетворительным измерительным методом был лишь баллистический и когда «непогрешимость» испытания по стандарту (в данном случае только кажущаяся) выдвигалась в качестве самодовлеющей цели на первый план.

Мы же ставим перед испытанием одну единственную цель — наилучшим образом характеризовать пригодность данного материала для данной технической задачи. Электротехника в подавляющем числе случаев ставит задачу о проницаемости в обратном (против ОСТ) смысле. Типовыми проектом какого-либо агрегата заданы рабочие индукции в каждой части магнитопровода, и требуется определить то намагничивающее поле или тот ток, который сможет обеспечить в данной партии материала эти расчетные значения индукции. Конечно, эти расчетные значения индукции взяты не случайно, они должны быть увязаны с типовой кривой намагничивания для стали определенной марки. Эта часть работы всегда проводится в научно-исследовательском порядке, базируясь на результатах специальных испытаний сталей различных марок по совершенно особой программе и никогда не ограничиваясь только стандартными испытаниями. Стандартные же испытания должны лишь решать вопрос о применимости данной конкретной партии стали для уже разработанной готовой конструкции, т. е. для работы при уже зафиксированной величине рабочей индукции.

И отсюда сразу же вытекает, что, например, проницаемость трансформаторной стали нужно характеризовать через эффективную (среднюю квадратичную) напряженность переменного поля при определенной величине индукции, например, при той же, при которой измеряются потери энергии в данной пробе. Для этого достаточно лишь снабдить обычные аппараты Эйтейна хорошими электродинамическими амперметрами.

Полученная таким образом характеристика будет прямой мерой тока холостого хода трансформатора из этого материала, т. е. как раз тем, что только и нужно для техники; она совершенно прямо, без всяких промежуточных пересчетов будет вскрывать истинное качество проверяемого материала и этим будет содействовать борьбе за его качество в гораздо большей степени, чем применяемые сейчас косвенные показатели B^{25} .

¹ В частности, большая работа по этому вопросу ведется в настоящее время работниками Центральной лаборатории Верх-Исетского завода.

и², которыми, кстати сказать, даже сами пищи стали интересуются очень вяло, неся на явный ущерб, происходящий от этого народного хозяйства.

тая перестановка местами зависимой и независимой переменной (выражаясь математическими языками) при испытании стали на проницаемость требует, конечно, серьезного пересмотра метода испытаний, но как видно из приведенного мера с трансформаторной сталью, больших трудностей это не вызовет. В частности, для испытания динамной стали, работающей в постоянном магнитном поле, можно будет сохранить оправдавший себя на практике дифференциальный метод, при некоторой переделке схемы аппарата. Для тех случаев, где прямой характеристикой является амплитудная проницаемость в переменном поле, ее можно измерить без особого труда рядом способов³ и т. д.

Все предложенные здесь изменения характеристик имеют своим следствием не только уменьшение разрыва между условиями эксплуатации материала и условиями его испытания, но также серьезное упрощение самих испытаний. Это открывает возможность разработать новые методы испытаний, не требующих разрушения испытуемого материала, и при помощи их охватить испытания

ниями значительно большее количество материала, чем это возможно при способе Эпштейна (при этом способе испытываемые листы разрезаются на мелкие полоски, т. е. по существу уничтожаются, поэтому о значительном расширении охвата материала испытаниями по этому способу говорить не приходится).

Такие методы⁴ позволяют ставить вопрос даже о сплошных испытаниях целых партий выпускаемой стали и о рассортировке их на пакеты с очень высокой однородностью, с гарантией не только за среднее качество данной партии, но и за соответствие качества каждого листа этому среднему показателю. Не нужно доказывать, насколько такое мероприятие помогло бы поднять качество изделий нашей электропромышленности. Чрезвычайный разнобой в качестве отдельных листов стали даже внутри одной и той же партии заставляет конструкторов применять в настоящее время очень большие допуски, которые немедленно отпадут, как только однородность стали может быть заранее гарантирована. Но применяемые сейчас характеристики электротехнической стали настолько громоздки и запутаны, главное здесь так перемешано со второстепенным, что сортировать что-либо в строгом соответствии с этими характеристиками нет никакой технической возможности.

И с этой точки зрения также будет вполне своевременным коренным пересмотр всей системы принципов испытания магнитных качеств электротехнической стали, т. е. основательная переделка существующего стандарта.

¹ Так как при $B \geq 14000 \text{ G}$, $d \frac{B}{B} \ll d \frac{H}{H}$, сравнение обоих с резко различным качеством при одинаковом поле колебания в проницаемости лишь на 2–3%, т. е. почти заметные, в то время как проницаемость этих же образцов, измеренная при одинаковой индукции, будет отличаться на 50% и выше.

² См., например, Р. Янус, Журнал техн. физики, 3, 1208, 1953.

³ Разработка таких методов частично уже ведется в Уральском физико-техническом институте.

Низковольтная замкнутая сетка в Московской кабельной электросети

К. Л. Плюснин
Мосэнерго

ПРОЕКТИРОВАНИЕ и исследование работы замкнутых электросетей низкого напряжения в последние годы встречали интерес в различных проектных и эксплоатационных организациях Союза. Еще 6 лет назад в Ростове-на-Дону и в Москве производились опыты по выжиганию кабелей. Затем в Ленинграде, в Москве и на Горьковском автозаводе были образованы опытные участки замкнутых сеток, но они работали не с нормальной сетевой автоматикой, применяемой для таких сетей за границей. Лишь в последний год в Москве включены в работу два участка сети, снабженных нормальной автоматической аппаратурой. Изложение метода проектирования этих участков и сообщение о первых наблюдениях над их работой и является задачей настоящей статьи. Интерес к построению замкнутых сетей низкого напряжения станет понятен, если вспомнить, что они обеспечивают максимальную бесперебойность в снабжении потребителя энергией повышенного

качества. Эти свойства сетки вытекают из принципов ее устройства.

Все кабели сети низкого напряжения соединяются между собой во всех трансформаторных и соединительных пунктах в узлы. Питание получившейся таким образом «сетки» производится от ряда однотипных трансформаторов. Последние в свою очередь питаются от нескольких фидеров высокого напряжения, причем присоединяются к ним таким образом, чтобы соседние трансформаторы питались от разных фидеров. Такое включение обеспечивает надежное взаимное резервирование трансформаторов по низковольтным кабелям в случае выключения одного из фидеров высокого напряжения. Повреждения кабеля низкого напряжения вызывают в месте повреждения дугу, весьма интенсивную вследствие большой трансформаторной мощности, работающей на место к. з., и большой проводимости замкнутой сети.

Большой ток к. з. вызывает интенсивную дугу, которая быстро выжигает место повреждения кабеля, после чего дуга гаснет, напряжение восстанавливается, и все абоненты, расположенные по обе стороны от места повреждения, продолжают получать питание. Повреждение же на стороне высокого напряжения вызывает ток из сетки в трансформатор, который заставляет отключиться специальный сетевой автомат, устанавливаемый на низковольтной стороне каждого трансформатора; сетка же и в этом случае продолжает питаться от оставшихся в работе фидеров.

Кроме того, существенным достоинством замкнутой сетки является дешевизна и простота ее расширения при росте нагрузки.

Таковы основные черты замкнутой сетки, введенной впервые в США еще в 1921 г. и, начиная с 1926 г., получившей там особое распространение. К 1931 г. число сетевых автоматов достигло цифры более 4000 шт., и мощность установленных трансформаторов более 1000 MVA.

Развитие замкнутой сети начинается часто с устройства в крупном здании «вертикальной» или «местной» сетки, которая представляет собой несколько трансформаторов, питающихся от различных фидеров, присоединенных к низковольтной системе, распределяющей электроэнергию по данному дому. Возникновение такой же местной сетки поблизости, соединение ее с первой и, наконец, включение такого «куста» в общую замкнутую сетку — таков схематически путь развития.

Перед введением замкнутой сетки низкого напряжения в Московской кабельной сети для получения опытных данных еще в 1930 г. был создан первый участок ее, в котором были проделаны опыты к. з. в кабеле и выжигания его, а также испытана в небольшом масштабе замкнутая сеть и параллельная работа на низком напряжении нескольких сетевых трансформаторов.

Эта замкнутая сетка, расположенная в районе площади Маяковского, объединяла в себе всего 6 трансформаторных помещений и была оборудована автоматами, переделанными из контакторов для подъемных механизмов и реле — из однофазных счетчиков Вестингауза. Эта сетка питалась от двух фидеров. После двух лет работы вследствие непригодности экспериментальной аппаратуры к длительной эксплоатации опытный участок сетки был разомкнут и приведен к первоначальному виду радиального питания. Однако этот опыт эксплоатации и эксперименты показали возможность перехода на сетку уже большего участка сети, включающего в себя несколько десятков трансформаторов и оборудованного нормальной сеточной аппаратурой. Эксплоатация такого участка должна была дать уже более широкий опыт и послужить началом внедрения замкнутой сетки в низковольтную сеть Москвы.

Основные параметры такой сети определились, исходя из следующих соображений.

При выборе рабочего напряжения стремились сохранить у потребителей существующее напряжение — 120 V. Следовательно, нужно было принять напряжение сетки 120 V или 220/127 V.

Необходимость одновременно повысить пропускную способность сети и экономические под-

счеты говорили в пользу напряжения 220 V. Существовавшее мнение¹ о том, что наилучшим напряжением с точки зрения выжигания мест повреждения в кабеле низкого напряжения является 220 V окончательно определило выбор напряжения сетки — 220/127 V с заземленным нулем.¹

Сечение кабелей, определяясь в основном существующей сетью, должно было обеспечить достаточные для выжигания токи к. з. Для сетки были выбраны сечения трехжильных кабелей 3×70 и 3×95 mm². Все имевшиеся меньшие сечения были заменены ими.

Токи, необходимые для выжигания повреждения в кабелях таких сечений, были определены на основании опытных и литературных материалов в 4000—5000 A.

Вопрос о применении в узлах предохранителей был решен отрицательно, учитывая практику США.

Для выбора района, предназначенного для перевода на замкнутую сетку, было взято несколько участков, которые оценивались с точки зрения следующих основных показателей: 1) плотность нагрузки; 2) характер кабельной сети низкого напряжения (возможность замыкания в сетку, сечения кабелей, конфигурация сети); 3) число фидеров высокого напряжения в данном районе; 4) устройство сети высокого напряжения (возможностью достаточного «перемещивания» трансформаторных помещений, питающихся от различных фидеров); 5) характер нагрузки; 6) форма кварталов, размер их и расположение улиц; 7) состояние уличных мостовых²; 8) возможность экспериментального питания сетки от различных источников тока наряду с нормальной работой от одних шин.

При дальнейшем развитии сетки и увеличении ее мощности может появиться необходимость питания сетки от нескольких генераторов, т. е. осуществление параллельной работы через сетку. Придется столкнуться с проблемами устойчивости при параллельной работе станций на сетку, вопросами уравнительных токов, реверсирования мощности через сетевую аппаратуру и пр. Для возможности исследования всех этих вопросов надо выбрать участок сетки в той части города, которая может иметь фидеры от разных источников питания.

С точки зрения возможности удовлетворения этих требований были выбраны в Москве четыре района сети, для которых были спроектированы замкнутые сетки. Наиболее характерные показатели этих районов приведены в таблице.

Из четырех участков, приведенных в таблице, был выбран район Замоскворечья № 3 со средними показателями. При выборе этого участка руководствовались еще соображением, что он сможет послужить базой для экспериментов, так как район его не центральный.

Участок № 3 питается от кабельных вводов

¹ В настоящее время немецкая практика показывает, что и при напряжении 380 V выжигание происходит удовлетворительно.

² Ввиду возможности в первое время работы сетки неполадок и необходимости производства ремонта желательно экспериментальный участок выбрать в той части города, где вначале будут иметься мостовые с простым замощением бульжником.

Наименование показателей	Район Бауманский № 1	Район Центра № 2	Район Замоскворецкий № 3	Район ул. Горького № 4
1. Площадь участка, km^2	—	—	0,6	0,6
2. Нагрузка, kVA	2400	5000	2200	2100
3. Моторная нагрузка, %	60	—	40	22
4. Плотность нагрузки, kW/km^2	5300	11 000	3600	3500
5. Длина сети низкого напряжения, km	10	—	12,5	19,7
6. Число фидеров в районе	4	5	4	2
7. Число часов работы максимума	5200	3300	3800	3100
8. Наименьший расчетный ток к. з.	2000	—	5800	—
9. Стоимость работы по переводу на замкнутую сетку, тыс. руб.	238	667	400	—
10. Мостовые	Булыжник	Асфальт	Булыжник	Асфальт
11. Возможность двухстороннего питания	Нет	Нет	Да	Да

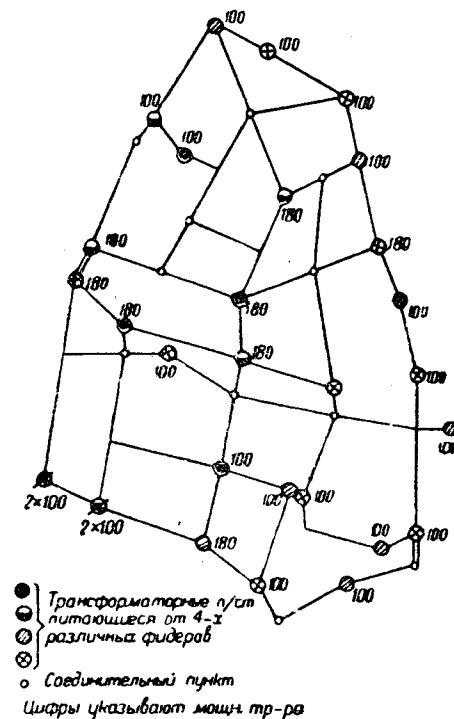


Рис. 1. Схема сети низкого напряжения

с числом около 300, отходящих от магистралей, представляющих собой хорошо разветвленную сеть, 94% длины которой составляют кабели 3×70 и $3 \times 95 \text{ mm}^2$. Остальные 6% кабелей другого сечения были в дальнейшем заменены.

Проектирование перевода участка на замкнутую сетку в первом его этапе потребовало определения наивыгоднейшего расстояния между трансформаторными пунктами и мощности трансформаторов, исходя из условий нагрузки и необходимого резерва.

Соответствующие расчеты, произведенные по методу Буллэрда, дали результат, близкий к существующим средним расстояниям между трансформаторами в данном районе. Поэтому все трансформаторные пункты за исключением двух, расположенных слишком близко, и одного, сооружаемого вновь, были оставлены в качестве пунктов, питающих сетку. Таких пунктов получилось 27 с установленными в них 30 трансформаторами: 24 единицы по 100 kVA и 6 единиц по 180 kVA. Поверочный расчет, о котором будет сказано ниже, внес исправления в первоначальный проект, и мощность трансформаторов составила 3640 kVA (22 по 100 kVA и 8 по 180).

При проектировании сети низкого напряжения была поставлена задача создать достаточно густую и равномерно распределенную сеть, чтобы обеспечить: 1) резервирование мощности одного трансформатора другими близлежащими и 2) получение токов к. з., достаточных для быстрого и надежного выжигания места повреждения. Для этого радиальные кабельные направления были продлены до пересечения с другими кабелями или до трансформаторного или соединительного пункта.

Места же с редкой сетью были усилены добавочно проложенными кабелями. В результате

сеть низкого напряжения приняла вид, изображенный на рис. 1. В этой схеме вновь проложенные кабели составляют лишь 20% от общей длины сети в 12,5 km.

Проектирование 6-kV питающей сети свелось к тому, чтобы возможно более «перемешать» трансформаторные помещения, питающиеся от четырех различных фидеров. Это потребовало докладки около 1500 м кабеля и деления в некоторых подстанциях шин 6 kV на 2 секции. Схема сети 6 kV приведена на рис. 2.

В связи с переводом района на 220 V возникли вопросы о нулевом проводе и о переустройстве абонентских установок. Вопрос о переводе сети со 120 на 220/127 V (четырехпроводная сис-

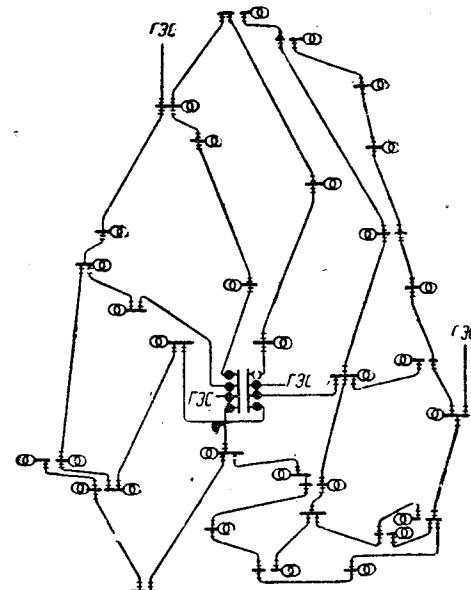


Рис. 2. Схема сети высокого напряжения

тема) вызывает затруднение при введении его в сеть с трехжильными кабелями. Прокладка отдельного четвертого провода по длине всех кабелей связана с крупными работами, а также влечет за собой и увеличение индуктивного сопротивления нулевого провода в этих условиях. Поэтому возник интерес к возможности использования свинцовой оболочки кабелей в качестве нулевого провода. Однако, учитывая опыт эксплуатации такой системы в Ленэнерго и по ряду теоретических соображений (уменьшения сечения нулевого провода до 12—14% от сечения рабочего провода), в Мосэнерго от применения свинцового нуля отказались и остановились на прокладке для этой цели специального голого медного провода.

Соответствующие расчеты и замеры показали допустимость объединения защитного заземления сети высокого напряжения и рабочего заземления сети низкого без опасений получения опасных потенциалов.

Переустройство абонентских установок на напряжение 220/127 В было серьезной проблемой как по стоимости (около 25% стоимости всего перевода участка на сетку), так и по трудоемкости. Подавляющее большинство моторов допускает переключение с 120 на 220 В, так что заменять пришлось лишь всего 3—4% общего числа их, но замена других трехфазных аппаратов, счетчиков и т. д., а также необходимость подвода нулевого провода к абонентам составляет весьма дорогую и кропотливую работу, тем более, что одновременно требуется устранить случайные заземления в сети низкого напряжения и привести ее в порядок в связи с повышением рабочего напряжения и заземлением нулевого провода.

Зaproектированная для выбранного участка сетка была проверена расчетом как в отношении нагрузок трансформаторов после замыкания сети в сетку, так и в отношении токораспределения в сетке и величин токов к. з. Весьма интересно было выяснить минимальное значение токов к. з., так как необходимо было обеспечить ток, достаточный для выживания повреждений, величина которого, как указывалось выше, была принята порядка 5000 А.

Такая проверка была проведена с помощью стола постоянного тока, так как классические методы аналитического расчета, исходящие из равенства напряжения в питательных точках, не давали реальных результатов и явились лишь подготовительным этапом работы. Расчет же на модели сети дал возможность учесть все факторы, влияющие на распределение нагрузки между трансформаторами с точностью, достаточной для суждения о целесообразности запроектированной сети. В качестве исходных данных для расчета сети были приняты фактические нагрузки всех вводов данного района с учетом их роста на 20%.

Каждая магистраль в замкнутой сетке питается с двух сторон. Поэтому все нагрузки были разнесены по концам такой магистрали по способу моментов. Суммированные в узлах эти нагрузки составили исходную карту нагрузок для расчета.

Вторым элементом, необходимым для расчета,

являлись сопротивления кабелей, трансформаторов и нагрузок сети. На столе постоянного тока невозможно учесть фазы падения напряжения на этих элементах. Это заставило принять для расчета потери напряжения в них равными

$$v = I(r \cos \varphi + x \sin \varphi).$$

Эта величина является проекцией падения напряжения на некоторый вектор, опережающий ток I по фазе на угол φ . Таким вектором является напряжение на клеммах токоприемников или, что то же самое, импеданс нагрузки. Поэтому $\cos \varphi$ был принят равным 0,85 как среднее значение для данного района. Величина $r \cos \varphi + x \sin \varphi$ имеет размерность сопротивления и была названа эквивалентным сопротивлением z' . По этой формуле подсчитаны сопротивления всех кабелей и трансформаторов.

Для учета влияния сопротивления высоковольтных кабелей и реакторов на фидерах без усложнения схемы сопротивления трансформаторов были увеличены. Это увеличение было произведено, исходя из равенства потерь напряжений в высоковольтной сети. Для этого эквивалентное сопротивление цепи от шин станции до данного трансформатора множилось на полный ток, протекающий по данной цепи. Полученная потеря напряжения, деленная на номинальный ток данного трансформатора, и есть эквивалентное сопротивление высоковольтной сети, отнесенное к данному трансформатору. Далее оно пересчитывалось с 6600 на 220 В и прибавлялось, как это указывалось выше, к сопротивлению трансформатора.

Схема с подсчитанными таким образом сопротивлениями была собрана на расчетном столе постоянного тока и определена как загрузка трансформаторов, так и распределение нагрузок по кабелям сетки³.

В результате расчета, как уже указывалось, была изменена мощность двух трансформаторов вследствие выявившейся их перегрузки.

Аналогичный расчет сетки был произведен и на столе переменного тока⁴, который дал результаты, более близкие к действительности, отличающиеся несколько от результатов, полученных на столе постоянного тока.

Однако эта разница не настолько значительна, чтобы доказать несостоятельность расчета на столе постоянного тока. Предполагающиеся в дальнейшем замеры токораспределения и загрузок трансформаторов в осуществленной сети будут, несомненно, интересным контролем методов расчета.

Для принятого типа замкнутой сетки решающим явился вопрос аппаратуры.

Харьковский электромеханический завод (ХЭТЗ) ограничился лишь разработкой чертежей сетевого автомата типа АС-1, а Московская кабельная сеть выполнила образец такого автомата и передала заказ на него заводу им. Орджоникидзе, который выпустил их в количестве 40 шт. Этот автомат, изображенный на фотографии (рис. 3),

³ Более подробно см. В. Н. Степанов, Задачник по расчету электрических сетей, 1935, стр. 147.

⁴ Расчет производился на столе переменного тока ТЭП под руководством проф. А. А. Глазунова.

представляет собой трехполюсный воздушный выключатель переменного тока 220 В на силу до 800 А. Максимальная разрывная сила тока равняется 20 000 А при 220 В.

Выключатель имеет автоматическое и ручное управление. Ручка управления может быть установлена и заперта в трех различных положениях: включенном, нейтральном и выключенном соответственно положению автомата. Автоматическая работа выключателя происходит при нейтральном положении ручки с помощью включающего и выключающего соленоидов, которые работают от напряжения сети. Установка ручки во включенное или выключенное положение разрывает цепи автоматического управления выключателем при помощи специальной блокировки.

Со стороны сети выключатель снабжается специальными предохранителями на 2- или 3-кратную величину номинального тока. Эти предохранители, имея большую теплоемкость, обладают значительной выдержкой времени, благодаря чему к. з. в сетке успевает выгорать раньше, чем они расплавятся. Поэтому они служат защитой лишь от к. з. в самом автомате.

Контактная система, состоящая из трех последовательно работающих — главных, предварительных и искрогасительных — контактов, снабжена магнитным дутьем и специальными искрогасительными камерами.

Включающий соленоид при включении потребляет ток до 65 А при 220 В, а выключающий работает в пределах от 15 до 220 В.

Автоматические выключатели, выпускаемые иностранными фирмами, мало чем отличаются от АС-1, если не считать некоторых деталей, имеющихся в тех типах, включение которых производится не соленоидным, а моторным приводом.

Релейная защита типа КЗ-104, действующая на сетевой автомат, разработана и построена заводом ХЭТЗ по оригинальной схеме, предложенной инж. Бреслером. Эта защита выпускается заводом комплектно в виде отдельной панели.

На рис. 4 изображена схема защиты для одной фазы в упрощенном виде. Индукционное реле мощности ИМ-46 приключено своей вольтметровой обмоткой к фазовому напряжению сети, токовая же обмотка питается от специального трансформатора тока, встроенного в автомат. Трансформатор этот имеет 3 вторичных обмотки: одна из них является нормальной вторичной обмоткой трансформатора тока и питает токовую обмотку реле, а две другие добавочные одинаковые обмотки намотаны навстречу одна другой с одинаковым числом витков и приключены к фазовому напряжению до и после автомата. Для простоты предположим, что оба ползунка установлены таким образом, что регулируемое и нерегулируемое сопротивления равны. Тогда при включенном автомате обе обмотки будут находиться под одинаковым напряжением. Магнитные потоки, создаваемые ими, взаимно уравновесятся и трансформатор тока будет работать как нормальный, питая токовую обмотку реле ИМ-46. При появлении тока из сетки в трансформатор реле замкнет свои выключающие контакты, и автомат отключится.

При разомкнутом же автомате каждая из добавочных обмоток трансформатора тока оказы-

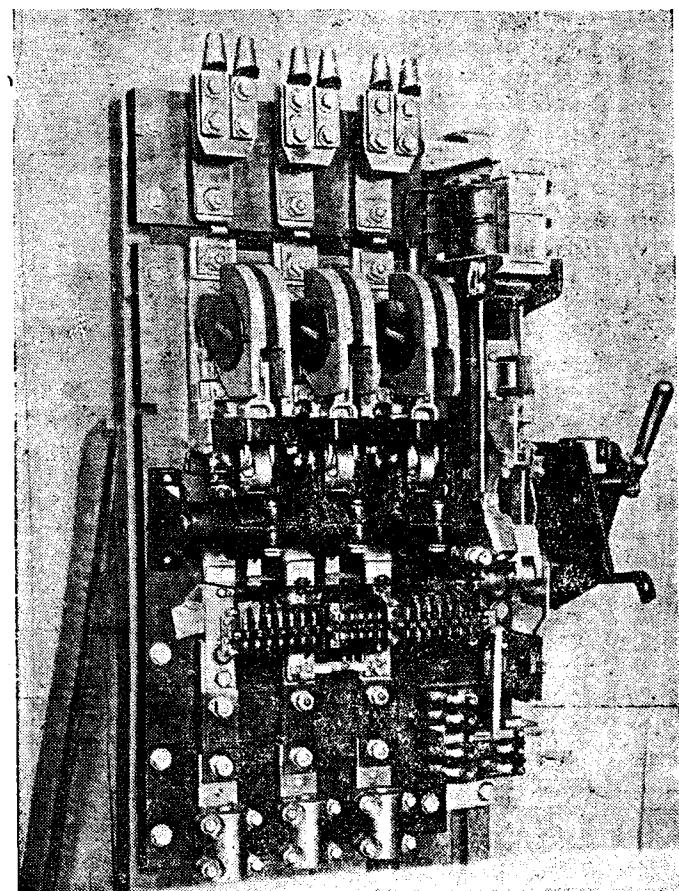


Рис. 3. Сетевой автомат АС-1

вается приключенной к различным напряжениям: одна к напряжению трансформатора, другая к напряжению сети. Общеизвестно, что приключении к сети трансформатора, напряжение которого выше напряжения сети и опережает его на некоторый (небольшой) угол, поток активной мощности после включения оказывается направленным в сеть. В трансформаторе тока в этом случае создается магнитный поток, являющийся разностью потоков, создаваемый двумя добавочными обмотками. Он наводит в токовой обмотке такую э. д. с., вследствие которой в реле потечет ток, действующий в сторону замыкания включающих контактов. Тогда через промежуточное реле и контактор произойдет питание включающего соленоида — автомат включится.

Характеристика работы сетевой защиты на включение, построенная в полярных координатах,

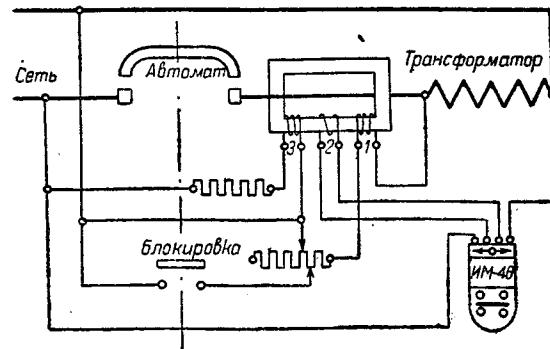


Рис. 4. Схема одной фазы сетевой защиты

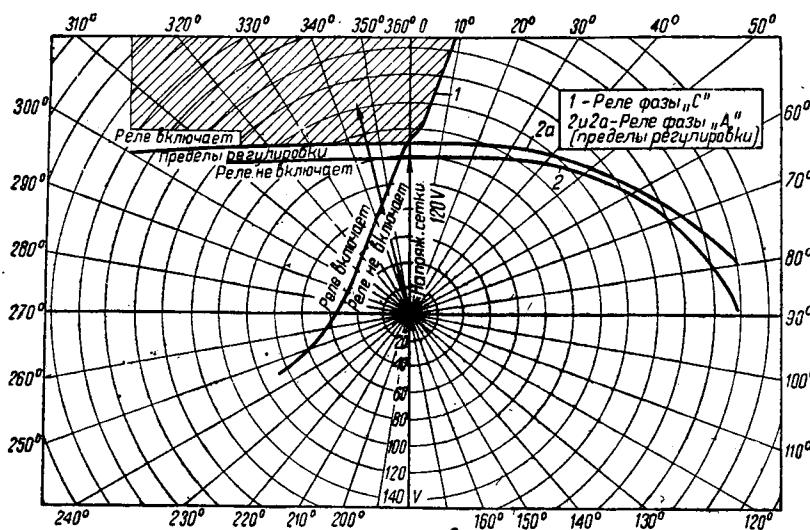


Рис. 5. Характеристика включения

приведена на рис. 5. Кривые 2 и 2a дают предельные характеристики реле одной фазы, а кривая 1 — другой, сдвинутой на 120°, благодаря тому, что напряжение к реле подводится от соседней фазы. Контакты же обоих реле соединены последовательно, и включение автомата происходит только тогда, когда оба реле работают в соответствующем направлении. Таким образом для включения необходимо, чтобы конец вектора напряжения трансформатора находился в заштрихованной области, т. е. удовлетворял бы условию, приведенному выше.

На рис. 6 приведены выключающие характеристики сетевой защиты; сплошная кривая дает наибольшую чувствительность, пунктирная — наименьшую. В том случае, когда ток является обратным по отношению к напряжению сетки, т. е. вектор тока расположен ниже выключающей характеристики, реле замыкает выключающие контакты, и автомат отключается.

Общий вид панели сетевой защиты виден на рис. 7. Размер панели 700 × 1000 мм.

Описанное устройство сетевой защиты позволяет ей выполнять функции, требующиеся от нее

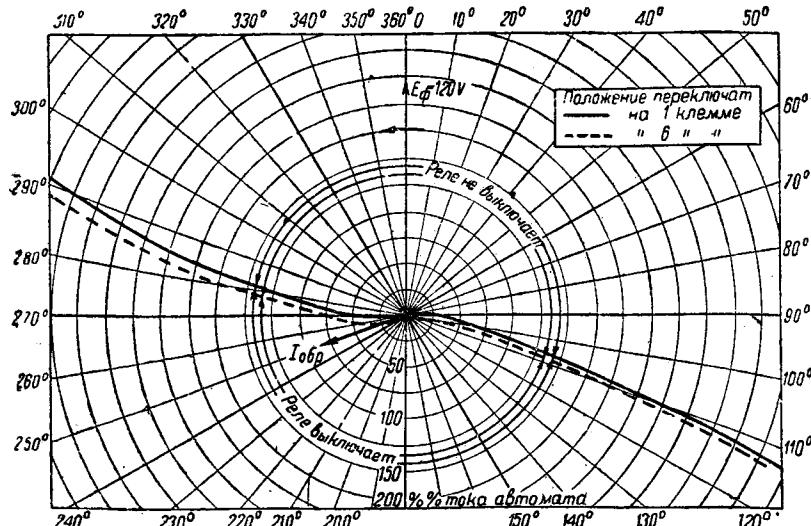


Рис. 6. Характеристика отключения

при работе замкнутой сетки; так, при включенном автомате и при наличии трансформаторе напряжения, опережающего напряжение сетки и превышающего его на некоторую величину, автомат включается, причем разность напряжения регулируется в пределах от 0 до 10 В.

Такая работа автомата позволяет включить его дистанционно, давая напряжение на питающий фидер высокого напряжения с подстанции.

При включенном автомате в случае отключения питающего фидера высокого напряжения на подстанции в соответствующие трансформаторы потечет из сетки ток холостого хода, и автомат отключится, работая как аппарат обратной мощности. То же произойдет и при к. з. в питающем кабеле высокого напряжения, когда в место повреждения потечет ток из сетки низкого напряжения.

Для этих условий панель защиты допускает регулировку в пределах от 2,5 до 30 А (активных).

Аппаратура, установленная в осуществленной сети, отрегулирована таким образом, что автомат включается при разности напряжения 1 В и выключается от тока холостого хода трансформатора 100 kVA, активная составляющая которого равна 4,7 А.

Перед установкой аппаратуры в сети она была подвергнута детальным испытаниям и исследованиям. Так, автомат был подвергнут автоматическому включению — выключению 2000 раз; включающий механизм при этом не проявил никаких дефектов. Кроме того, он был длительно испытан током 800 А. При этом температура наиболее нагревшейся точки автомата достигла превышения

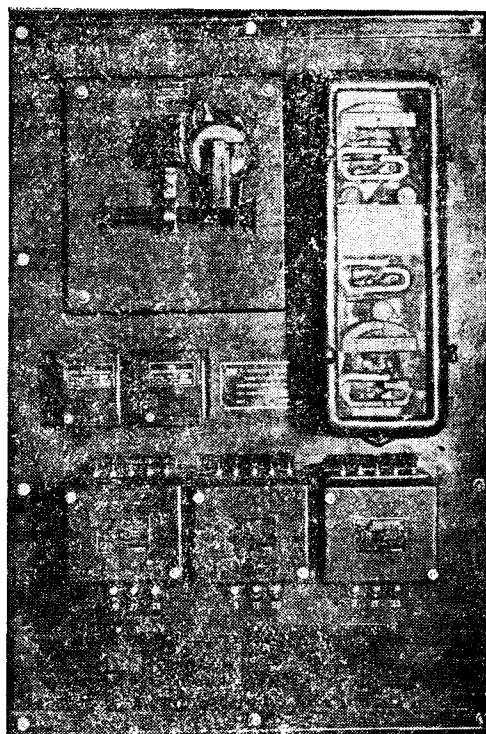


Рис. 7. Панель сетевой защиты КЗ-104

температурающей среды на 43°. Столь тщательным испытаниям была подвергнута кабель сетевой защиты.

Описанная здесь замкнутая сетка осуществлена участке №3 в Ленинском районе (Замоскворечье) и частично — в количестве 10 трансформаторов — в эксплуатацию летом 1936 г. Кроме того, в это же время включен другой участок замкнутой сетки, оборудованный той же описанной выше аппаратурой.

Последний участок является по существу местной замкнутой сеткой и обслуживает один из крупных домов Москвы. Схема этой сетки ясна из рис. 8. Здесь имеется 6 трансформаторов по 100 kVA, 6600/220 V, питающихся от двух высоковольтных фидеров, работающих через сетевые автоматы на общие сборные шины низкого напряжения. От последних через предохранители питаются низковольтные фидеры, распределяющие энергию по этажам дома.

Конструкция трансформаторных помещений в обеих замкнутых сетках различна.

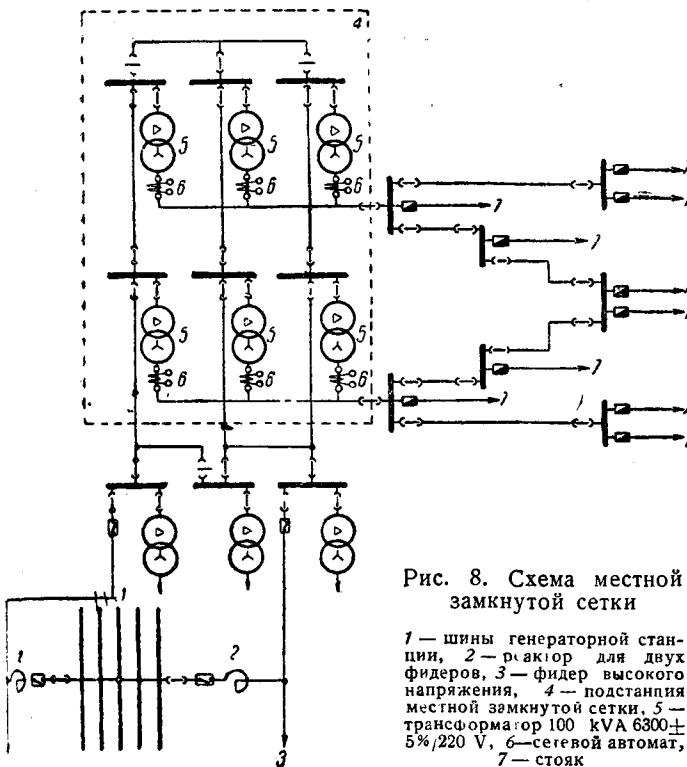


Рис. 8. Схема местной замкнутой сетки

1 — шины генераторной станции, 2 — реактор для двух фидеров, 3 — фидер высокого напряжения, 4 — подстанции местной замкнутой сетки, 5 — трансформатор 100 kVA 6300±5%/220 V, 6 — сетевой автомат, 7 — стойки

В замкнутой сетке участка №3 трансформаторное помещение представляет обычное сетевое помещение с установленными в нем автоматом и панелью реле, которые располагаются обычно между трансформатором и сборными шинами низкого напряжения.

В местной же сетке трансформаторное помещение, расположенное в подвале, разделено на две части. В одной установлены трансформаторы, вводы высокого напряжения и их трансформаторы, в другой — автоматы панели реле и сборные шины низкого напряжения (рис. 9).

Дальнейшие работы по замкнутой сетке в Московской кабельной сети ведутся в направлении продолжения перевода на сетку участка №3 в Ленинском районе и доведении числа трансформаторов

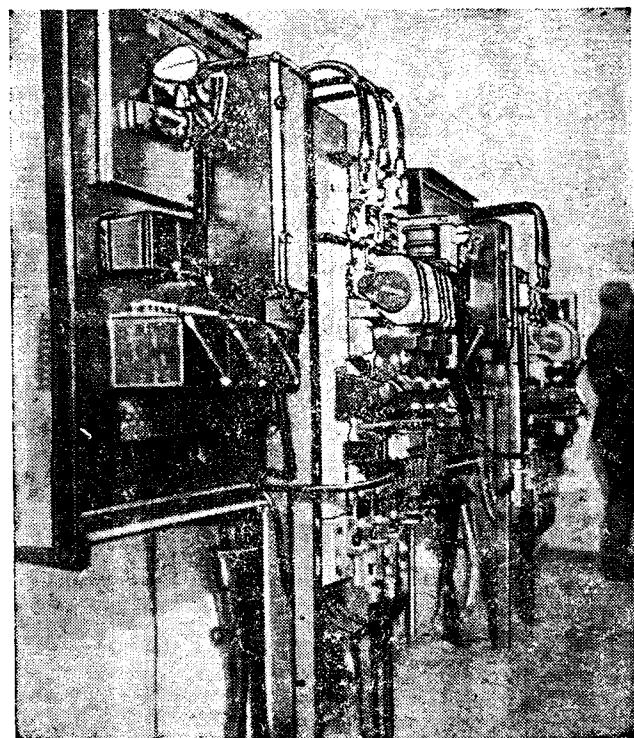


Рис. 9. Вид низковольтной части в местной замкнутой сетке

маторов в нем до проектного и развития местных замкнутых сеток в крупных домах в центре города, имея в виду дальнейшее объединение их в замкнутую сеть.

Это должно сопровождаться широкими исследованиями и изучением опыта эксплуатации существующих сеток, на базе которых будут разрабатываться проекты сети для новых районов Москвы.

Одновременно специальных исследований требуют вопросы экономики замкнутой сетки. Так, вопросы стоимости радиальной сети по сравнению со стоимостью замкнутой сетки, обладающей резервом как в отношении пропускной способности сети, так и в отношении трансформаторной мощности, должны быть подвергнуты углубленному анализу с учетом экономии потерь в замкнутой сети и экономической оценки аварийного недоотпуска в сети радиальной. Заслуживает также внимания проблема замкнутой сетки без автоматов; при наличии селективных предохранителей такая сеть с точки зрения экономической имеет определенные преимущества, так как на сегодняшний день стоимость сетевой аппаратуры весьма высока⁵.

Правда, есть основания ожидать, что в дальнейшем цена эта значительно снизится.

Оценивая далее реальные возможности завода ХЭТЗ, можно с определенностью сказать, что аппаратура для замкнутых сеток — автомат и панель защиты — может быть окончательно освоена к началу 1938 г.

Это даст возможность широко внедрить замкнутые сети — наиболее совершенные схемы распределения электрической энергии — в крупных городах Советского Союза.

⁵ Первая партия в 40 комплектов сетевой защиты обошлась по 11 000 руб. за комплект.

Автоматические гидроэлектростанции без регулятора скорости

М. П. Суслов

Всесоюзный институт гидромашиностроения

На всякой гидростанции из основного оборудования самым дорогим элементом после турбины является регулятор скорости. Процент стоимости его от стоимости турбины колеблется в пределах от 100 до 50. Например, ЛМЗ выпускает гидроэлектростанции скорости для турбин малой мощности (до 5000 кВт) ценой 30 000 руб. и выше, тогда как сама турбина стоит около 40 000 руб. При такой дороговизне регуляторов наши мелкие гэс вынуждены иногда прибегать к ручной регулировке.

На некоторых гэс, работающих параллельно на мощную сеть, регуляторы скорости без ущерба для эксплуатации могут быть сняты и заменены более простым аппаратом — аппаратом безопасности.

Ниже мы приводим описание двух американских автоматических гэс, работающих без регулятора скорости.

Автоматическая гидростанция Паришвиль. Гидростанция расположена на реке Реджи и оборудована одной горизонтальной турбиной Френсиса 3060 л. с. при напоре 39 м. Станция работает параллельно с мощной сетью и полностью автоматизирована. Пуск и остановка производятся поплавковым контактором, который установлен в верхнем бьефе. Регулятор скорости заменен простым аппаратом фирмы Аллес-Чамес, представляющим цилиндр с поршнем. Поршень жестко связан с механизмом направляющего аппарата турбины. Аппарат выполняет функцию регулятора скорости и приводится в движение давлением воды напорного трубопровода.

Общая схема станции представлена на рис. 1.

Пуск. При определенном горизонте воды в верхнем бьефе поплавковый выключатель 1 замыкает свой контакт и оживляет током реле IX. Реле IX замыкает контакты 1X (2-3) в цепи главного контакта 4. Получив импульс, контактор 4 замыкает контакты 4(1-2), 4(3-4), 4(5-6) и 4(7-8). Контакт 4(1-2) блокирует реле 4 и обеспечивает бесперебойное его питание; контакт 4(5-6) включается и подготовляет цепь шунтового реостата к работе; 4(7-8) включается и подготовляет цепь защиты; контакт 4(3-4) включает цепь реле 65 к шинам собственных нужд, а также реле 40X.

Соленоид 65, получив напряжение, передвигает золотник аппарата, заменяющего регулятор скорости, и вода из напорного трубопровода поступает в цилиндр и своим давлением медленно открывает направляющий аппарат турбины. Турбина приходит во вращение.

Реле 40X начинает работать только через 7 сек (реле времени), и выключает станцию, если в цепи возбуждения имеется какая-либо ненормальность. При исправности этой цепи реле 40 получает напряжение от возбудителя и своим контактом 40 прекращает питание реле 40X. Реле 40X отключается от шин собственных нужд.

В момент, когда турбина достигает 95% нормального числа оборотов, центробежный контактор 13, установленный на валу турбины, замкнет свой контакт 13X; реле 13X, получив напряжение, замкнет свой контакт 13X(1-2). Реле 53 получит напряжение и замкнет контакты 53(1-2-3-4).

Этим достигается следующее: реле 52AX замыкает свой контакт 52AX, который оживляет током катушку включающего соленоида масляного выключателя и выключатель включается. Одновременно в цепи нулевой катушки 52A выводится сопротивление. Эта операция предотвращает падение выключения масляного выключателя, в случае, когда при включении его имеет место падение напряжения.

Благодаря включению реле 53 масляный выключатель 52A включается и генератор присоединяется к общему кольцу.

При включении масляного выключателя разыгрываются его контакты *b* и включаются контакты *a*. Одна пара контактов выключателя включает цепь питания катушки 53, которая в свою очередь включает реле 52AX и включающий соленоид выключателя 52A обесточивается. Другой контакт *b* отключает вспомогательное реле минимального напряжения 37X.

Контакты *a* масляного выключателя 52A, замыкаясь, блокируют цепь реле 4, подают напряжение на катушку реле 41, подготовляя реле 12X, предохраняющее установку при

разгоне (12), при перегрузке (51) и при падении напряжения в сети переменного тока (37), — к отключению агрегата.

Реле 41, получив питание, включает цепь возбуждения через свои контакты 41(1-2-3-4), одновременно отключает контакты 41(5-6), выводя сопротивление из цепи ротора генератора, и отключает контакты 4(9-10), включая полностью шунтовой реостат.

Генератор, таким образом, присоединен к общему кольцу с полным возбуждением. Процесс пуска происходит в течение двух минут.

Нормальная остановка. Нормальная остановка производится поплавком 1 или кнопкой вручную.

При падении горизонта воды в верхнем бьефе поплавок опускается и разыгрывает свой контакт 1, прекращая питание контактора 4. Главный контактор 4 отключается, размыкает и замыкает свои вышеуказанные контакты.

Контактами 4(1-2) прекращается питание соленоида 65, золотник аппарата, заменяющий регулятор скорости, открывает доступ воды на поршень в сторону закрытия направляющего аппарата турбины и турбина останавливается. В момент закрытия направляющего аппарата турбины контакт центробежного контактора 33A разыгрывает цепь питания минимальной катушки масляного выключателя 52A и выключатель 52A отключает генератор от общего кольца.

При отключении выключатель разыгрывает контакты *a* и замыкает контакты *b*. Контакт *a* прекращает питание реле 41, реле срабатывает и разыгрывает контакты 41(1-2-3-4), прекращая питание ротора генератора, и замыкает контакты 41(5-6), которые вводят в цепь ротора сопротивление для гашения поля, и 41(9-10), подготовляя цепь возбудителя к последующему пуску.

Таким образом станция остановлена. При остановке вручную цепь контактора 4 разыгрывается от руки и остановка происходит так же, как было описано выше.

Остановка отключением на основной станции. Диспетчер на основной станции вырубает масляный выключатель на линии высокого напряжения, соединяющей основную станцию с гидростанцией Паришвиль. Случай идентиченбросу нагрузки.

Турбина на гидростанции Паришвиль быстро увеличивает число оборотов и центробежный контактор 12 замыкает свой контакт в цепи реле 12X. Реле 12X получает напряжение, воздействует своим контактом на выключающую катушку масляного выключателя 52BX, которая включает масляный выключатель 52B. Масляный выключатель вводит в цепь генератора водяное сопротивление, которое поглощает энергию генератора. Одновременно с этим масляный выключатель 52B своими контактами 52B-*b* и 52B разыгрывает цепь главного реле 4 и останавливает станцию так же, как и при нормальной остановке, и выключает масляный выключатель 52A при помощи нулевой катушки.

В момент, когда на шинах собственных нужд напряжение пропадает, минимальная катушка масляного выключателя 52B выключает масляный выключатель 52B. Последней операцией станция возвращается к положению для повторного пуска.

Аварийная остановка. Аварийная защита станции предусмотрена для следующих случаев: чрезмерное число оборотов реле (12); перегрев подшипников (38); падение давления воды в напорном трубопроводе (63); падение напряжения в цепи генератора (37); обрыв в сети возбуждения генератора (40); повышение напряжения в цепи возбуждения (45); падение напряжения в цепи собственных нужд (47); перегрузка на клеммах генератора (49); повышение напряжения на шинах собственных нужд переменного тока (59); короткое замыкание на шинах генератора (51), повреждение в обмотках генератора реле (87).

Для каждой защиты установлены соответствующие защитные реле (см. схему), где каждому реле соответствует свой номер, указанный выше в скобках. Все реле при аварии действуют на главное реле 4, разыгрывая цепь питания его. Главное реле 4 прекращает свое действие, разыгрывает свои контакты и останавливает станцию. Работу защитных реле

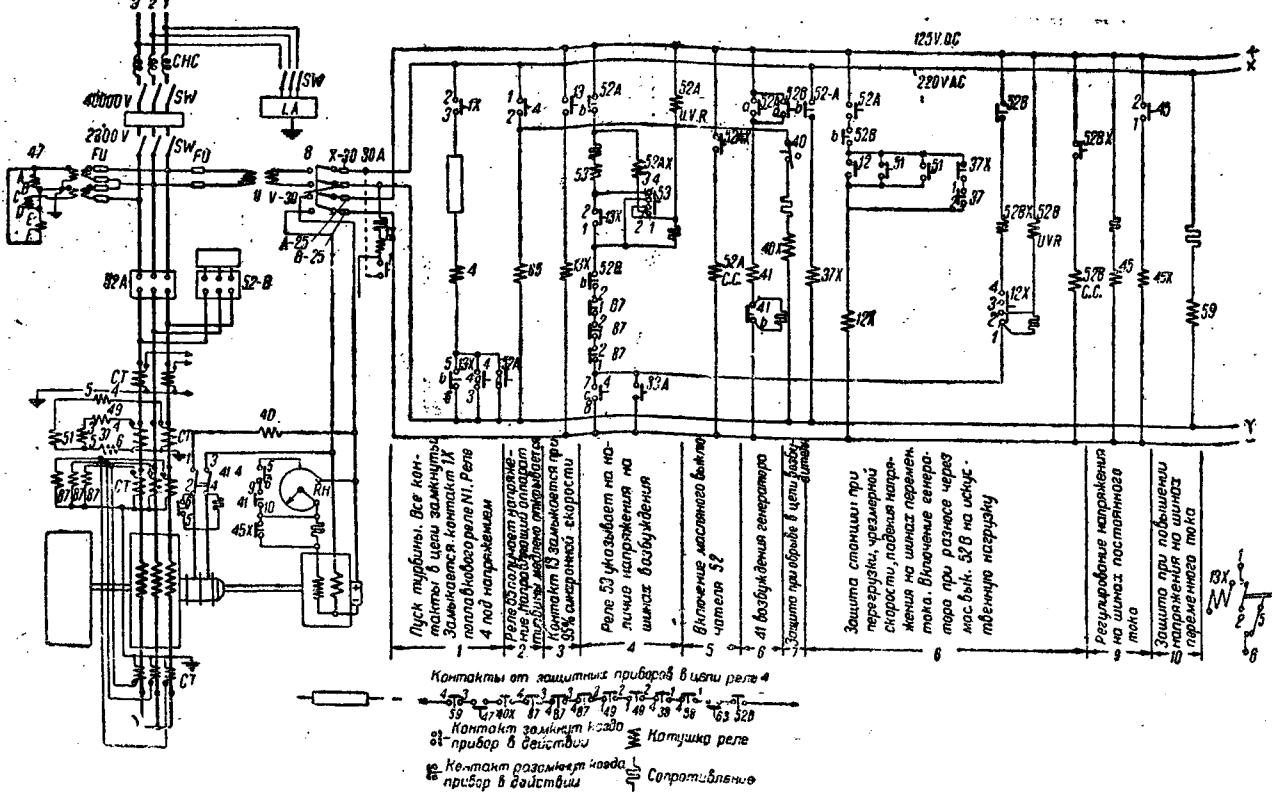


Рис. 1.

Для запуска станции при отсутствии напряжения на шинах переменного тока необходимо поддерживать соленоид 85. Для этого при открытии реле 41

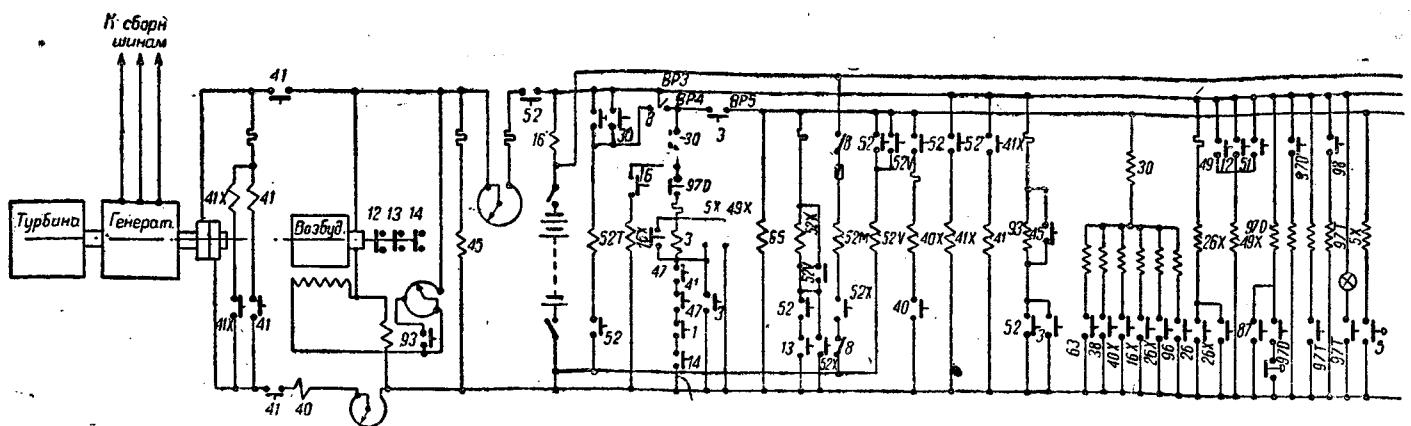
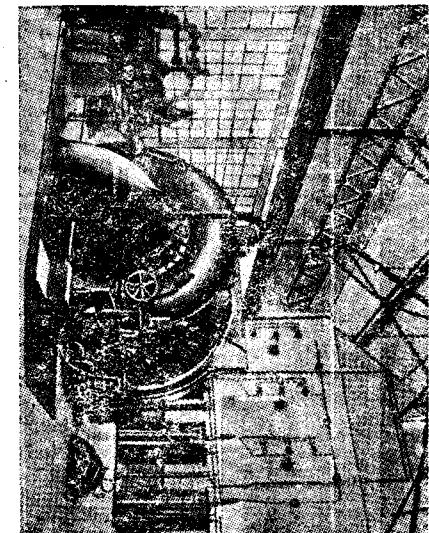


Рис. 3.

1 — поплавковое реле; 3 — главное реле; 5 — кнопка для остановки станции; 5X — промежуточное реле для остановки; 8 — рубильники; 12—13—14 — реле скорости; 16 — амперное реле для аккумуляторной батареи; 16X — промежуточное реле для 16; 26 — температурное реле для трансформатора; 26X — промежуточное реле для 26; 30 — аварийное реле; 38 — температурное реле при перегреве подшипников; 40 — реле возбуждения поля генератора; 41X — промежуточное реле для 40; 45 — реле повышения напряжения (переменного тока); 47 — реле направления фаз; 49 — температурное реле; 49X — промежуточное реле для 49; 51 — максимальное реле тока; 52 — масляный выключатель; 59 — реле повышения напряжения на главных шинах; 63 — реле давления воды; 65 — пусковой соленоид; 87 — дифференциальное реле; 90 — регулятор напряжения; 97Д и 97Т — защита при понижении напряжения; 98 — температурное реле



1112

легко проследить по схеме, и поэтому мы не останавливаемся на подробном изложении действия их.

Как особенность этой станции необходимо отметить следующее: отсутствие аккумуляторной батареи, регулятора напряжения и регулятора скорости; простота схемы как всей станции, так и схемы автоматизации; большая экономичность станции.

Станция Споулдинг № 3. Эта станция построена на берегу оз. Споулдинг и связана линией высокого напряжения со станциями Споулдинг № 1 и 2. Станция № 3 работает только 9–10 мес. в году, в остальное время года она используется как синхронный компенсатор.

Нагрузка генератора регулируется водотоком при помощи поплавкового контактора, установленного в верхнем бьефе.

Оборудована станция одной горизонтальной турбиной Френсиса 8000 л. с. при напоре 91,8 м. Управление станцией полностью автоматизировано (пуск, остановка, защита).

На этой станции регулятор скорости заменен аппаратом упрощенного типа. Этот аппарат представляет цилиндр с дифференциальным поршнем, который жестко связан с направляющим аппаратом турбины.

Общая схема станции представлена на рис. 3.

Пуск станции осуществляется включением масляного выключателя на станции Споулдинг № 1, соединяющий станцию № 3 со станцией № 1.

Станция № 3, получив напряжение, возбуждает реле 47, которое замыкает свои контакты в цепи реле 3 и размыкает блокировочный контакт, блокирующий реле 3.

Главное реле 3, получив напряжение, замыкает две пары своих контактов. Одна пара контактов 3 блокирует контакты 41, 47, 14, 1, другая пара контактов 3 подает напряжение на шины ВР5. Автоматическая аппаратура получает питание. Затем реле 65 получает напряжение и включает свои контакты: один в цепи, питающей соленоиды для открытия гидравлических задвижек, другой замыкает цепь главного реле 1, который блокирует себя и одновременно с тем разрывает цепи контактов 41, 47, 14 главного реле 3.

Соленоид А, получив напряжение, поворачивает клапан на 90°. Вода из левой части цилиндра привода гидравлической задвижки выходит и опорожняет его. Под давлением воды в напорном трубопроводе открывается дифференциальный клапан 1 и вода заполняет камеру турбины. Когда вода заполнит камеру турбины, замыкается контакт К, благодаря чему соленоид В получает напряжение и поворачивает клапан В на 90° (рис. 4).

Вода из напорного трубопровода устремляется в правую часть цилиндра, цилиндр начинает двигаться влево и открывает дроссельный клапан турбины. Дроссельный клапан в конечном открытом положении замыкает контакт Д и соленоид С получает напряжение. Соленоид С поворачивает клапан на 90°, вода поступает в левую часть цилиндра, давит на большую сторону поршня. Поршень передвигается влево и медленно открывает направляющий аппарат турбины.

Турбина медленно разворачивается и набирает число оборотов.

Когда турбина достигнет 95% номинальной скорости, цепной контактор, установленный на валу турбины, замыкает свои контакты 13 и реле 52Х получает напряжение.

Реле 52Х своим контактом включает реле 52М, которое включает масляный выключатель 52, и одновременно другим контактом блокирует контакт 13.

Как только масляный выключатель включится, замыкаются его контакты 52. Одна пара контактов 52 подает напряжение на выключающее реле 52У масляного выключателя 52 и подготавливает его к выключению, а также закорачивает на коротко реле 52Х, обесточивая его. Другая пара подает напряжение на реле 41Х, которое воздействует на реле 41. Реле 41 включает возбуждение генератора. Третья пара замыкает реле 40Х, которое действует только через 7 с, если к этому времени не появится напряжение на шинах возбуждения и реле 41 не разорвет цепь реле 41Х. Четвертая — замыкает цепь реле 93 для регулирования напряжения в пепи возбуждения. Пятая — подключает шины постоянного тока к возбудителю и дает возможность заряжаться аккумуляторной батареи. Шестая — замыкает цепь мотора М для регулирования нагрузки. Седьмая — замыкает цепь реле 95ХР и 95ХЛ, подготавливая ее для работы установки от поплавка. Восьмая пара контактов 52 замыкает цепь реле 52Т.

Таким образом станция автоматически включалась в сеть. Включение установки занимает две минуты.

Нагрузка генератора регулируется при помощи поплавка, установленного в верхнем бьефе. Схема состоит из поплавка, двух одинаковых реостатов, одного баланс реле и четырех промежуточных реле, которые воздействуют на мотор М.

При движении поплавка в ту или иную сторону нарушается баланс тока в цепи. Ток цепи сопротивления заставляет срабатывать баланс реле, которое замыкает соответствующие контакты промежуточных реле. Эти реле заставляют мотор М вращаться в ту или иную сторону. Мотор передвигает шток направляющего аппарата и одновременно передвигает сопротивление, расположенное на валу мотора М. Как только сопротивление достигнет величины, равной сопротивлению у поплавка, ток уравновешивается и баланс реле отключает свои контакты.

Остановка. Нормально станция останавливается кнопкой 5 со станции № 1. Диспетчер, нажав эту кнопку, замыкает реле 5Х, которое своими контактами 5Х блокирует реле 3. Реле 3 выключается и разрывает свои контакты, тем самым прекращается питание шин собственных нужд автоматической аппаратуры.

Реле 65 обесточивается и разрывает свои контакты. Соленоид С, не имея напряжения, поворачивает свой клапан на 90°, вода из левой части цилиндра поступает в общий сливной трубопровод. В то же время давление воды на правую часть поршня передвигает его влево, закрывает направляющий аппарат турбины. Когда поршень достигает своего крайнего левого положения, он замкнет конечный выключатель г, который блокирует реле 52Т. Реле 52Т обесточивается и выключает масляный выключатель 52.

Масляный выключатель 52 при выключении размыкает контакты и разрывает следующие цепи: аккумуляторной батареи от возбудителя, реле 52Т, реле 52У, реле 40Х и 41, выключая возбуждение поля генератора, реле 93, реле мотора М. Одновременно с тем он замыкает цепь реле 52Х, подготавливая масляный выключатель к повторному включению при последующем пуске установки.

Таким образом станция остановлена и готова к новому пуску.

Необходимо отметить следующее: При остановке от кнопки 5 главное реле остается под напряжением и своим разомкнутым контактом 1 в цепи реле 3 не дает возможности станции снова включиться; промежуточное реле МСЛ находится все время под напряжением и воздействует на мотор М до тех пор, пока конечный выключатель не разорвет его цепь.

Аварийная остановка. Всю защиту станции можно разбить на две части.

Первая часть воздействует на реле 30, и станция не может быть пущена в работу без осмотра персоналом и без устранения им причины аварии. Сюда относятся: падение давления в напорном трубопроводе (реле 63); перегрев подшипников (38), авария в цепи возбуждения (40); повышение температуры

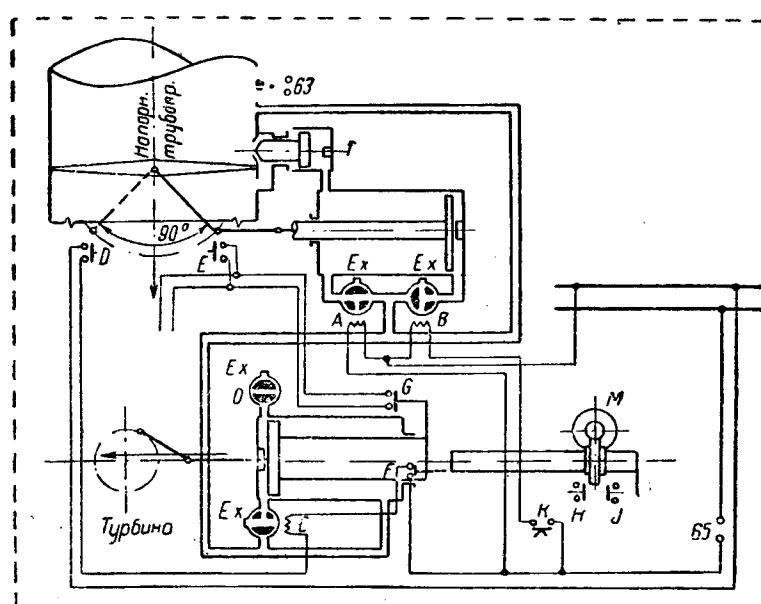


Рис. 4
Вологодская областная универсальная

и туры в силовом трансформаторе (26); разрядка аккумуляторной батареи (16); повышение температуры в обмотке генератора (96).

Вторая часть защиты действует непосредственно на реле и для повторного пуска станции необходим предварительный осмотр ее персоналом. К этой защите относится дифференциальная защита (реле 87). Она действует на реле 97D, которое разрывает питание реле 3. Кроме реле 87, на реле 3 действуют следующие реле: максимальное реле 57, реле перегрузки, центробежный контактор 12, реле обрыва фаз 47. При действии этих реле повторный пуск не требует призыва на станцию персонала.

При чрезмерном разгоне турбины предусмотрен клапан D, который воздействует на гидравлический аппарат и мгновенно останавливает станцию.

Станция № 3 работает нормально с 1929 г. За все это время не было аварий по вине автоматической аппаратуры.

Кроме описанных двух станций, в США имеется еще целый ряд гидростанций, работающих без регулятора скорости.

На низконапорных станциях в качестве энергии для передвижения сервомотора используют давление масла в системе масляного хозяйства или давление воды водопровода.

В наших условиях опыт подобных станций — применение упрощенного аппарата для турбин — может быть полностью, использован. Такие гидроэнергетические узлы, как канал Москва — Волга, Ташкентский узел, Севанский узел и др. могут применить у себя этот опыт. Тем более, что в третью пятилетку многие станции будут объединены в общее кольцо.

Применение упрощенного аппарата для турбин упрощает схему автоматизации и значительно понижает стоимость основного оборудования.

Малорелейная система телеуправления

ВОЛОГОДСКАЯ

СОВЕТСКАЯ

МЕДИАБИБЛИОТЕКА

Музей истории науки и техники, 9

А. С. Ходоренко
Ленинград

РАСТУЩАЯ техника электрического управления различного рода установками на расстоянии предъявляет большой спрос на устройства централизованного управления. В статье описывается одна из таких систем телеуправления, названная РВК-1 и выполненная для высоковольтных сетей Мосэнерго и Ивэнергокомбината.

Остановимся сперва на применяемой нами терминологии.

Телеуправление — управление на значительном расстоянии, когда приходится применять селективные методы управления. Центральный пункт — место, из которого осуществляется централизованное управление или дальненаблюдение. Управляемый пункт — место, в котором находятся управляемые или контролируемые объекты. Управляемый объект-объект, управляемый с центрального пункта (обычно такой объект является и контролируемым). Контролируемый объект-объект, состояние которого сигнализируется на центральный пункт, но управления он не имеет. Управляющий код — серия импульсов, передаваемая с центрального пункта, в результате приема которой в управляемом пункте производится действие с управляемым объектом (объектами). Известительный код — серия импульсов, передаваемая с управляемого пункта, в результате приема которой в центральном пункте получается сигнализация изменения состояния устройств управляемого пункта. Характер импульса — свойство импульса быть многозначным (положительный-отрицательный, длинный-короткий и т. д.).

Описываемая система телеуправления есть чисто релейная двухпроводная кодовая система. Это значит, что все необходимые действия совершаются исключительно посредством реле, а управление (или извещение) любым объектом системы осуществляется по одной и той же двухпроводной линии. Действие управления или извещения происходит в конце кода.

Характер импульса определяется его длиной. Иными словами, система является временной.

В системе применяются так называемые кодовые реле исключительно нейтрального типа, конструктивно весьма простые, а поэтому пра-

тически никогда не отказывающие в действии. Для того чтобы отдать предпочтение известительному коду перед управляющим, первый импульс известительного всегда длинный, а первый импульс управляющего — короткий.

Для всех устройств телеуправления, независимо от числа управляемых пунктов, требуется только одна линейная батарея, находящаяся на центральном пункте. Управляемые пункты имеют только по одному местному источнику питания.

Описываемая система рассчитана на 4 управляемых пункта (подстанции, насосные и т. д.) по 40 управляемых (контролируемых) объектов в каждом. Количество управляемых пунктов и объектов управления может быть и иным.

Все объекты внутри одной группы могут управляться или контролироваться одним кодом.

Для контроля состояния одного управляемого объекта требуются только две сигнальные лампы. Это упрощает монтаж и обслуживание пульта управления.

Время прохождения управляющего кода приблизительно равно времени прохождения известительного кода и ориентировочно может быть определено по формуле:

$$T = (1,50 + 0,25A) \text{ sec},$$

где A — порядковый номер числа, равного числу объектов ряда 5, 10, 20...

Для 160 объектов это время будет равно от 2,5 до 3,5 сек, в зависимости от числа длинных импульсов в коде.

Количество реле в центральном пункте на один управляемый объект:

$$n_1 = \frac{1}{N_1} (15 + 2,5A) + 1,4,$$

где N_1 — количество объектов, обслуживаемых центральным пунктом, а A — та же величина, что и в формуле для T .

Приближенно число реле на один управляемый объект в управляемом пункте:

$$n_2 = \frac{1}{N_2} (17 + 2,5A) + 1,6,$$

где N_2 — количество объектов управления в управляемом пункте.

В величину N_2 вошли общие управляющие и контрольные реле.

По сравнению с РТУ-7 данная система имеет на 3 реле меньше на каждый управляемый объект при значительно большей быстроте действия. Так, РТУ-7 при 40—50 объектах на передачу в одну сторону требует 5—7 сек, в то время как РВК-1 при 160 объектах требует только 2,5—3,5 сек.

Назначение реле-счетчиков — отсчет порядковых номеров импульсов. Их работу можно проследить из рис. 1.

Счетчик 1 при прохождении первого импульса в линии возбуждается по начинаяющей цепи a . Возбудившись, он переходит на питание по поддерживающей цепи через свой верхний контакт A_2 , нижние контакты A_2 следующих счетчиков и верхний контакт реле MP , который замкнут в течение всей передачи. При прохождении в линии следующего, второго импульса получает питание цепь возбуждения четных счетчиков, и так как реле 1 возбуждено, то через его верхний контакт G_2 возбуждается счетчик 2. Возбудившись, счетчик 2 переходит на питание по вышеуказанной поддерживающей цепи через свой верхний контакт A_2 и одновременно размыкает цепь поддерживаивания счетчика 1 на своем нижнем контакте A_2 , который и отпускает свой якорь.

При третьем, нечетном, импульсе в линии получает питание цепь возбуждения нечетных счетчиков и через верхний контакт G_2 счетчика 2 возбуждается счетчик 3, который переходит на питание по поддерживающей цепи через свой верхний контакт A_2 , а на своем нижнем контакте A_2 размыкает цепь поддерживаивания счетчика 2. При четвертом импульсе по цепи возбуждения четных счетчиков через верхний контакт G_2 реле 3 возбуждается, счетчик 4 переходит на питание по поддерживающей цепи через свой верхний контакт A_2 и размыкает цепь поддерживаивания счетчика 3. Следующие счетчики работают так, как было описано выше. Таким образом, суммируя, можно сказать, что нечетные счетчики, за исключением

чением 1, возбуждаются по своей цепи возбуждения, а четные — по цепи возбуждения четных счетчиков. Причем, возбудившись, каждый следующий счетчик выключает предыдущий, а сам переходит на питание по поддерживающей цепи.

Каждая система телеуправления должна иметь устройства для получения импульсов. В системе РВК-1 генерация импульсов происходит по схеме, показанной на рис. 2.

Реле-телеопередатчик T нормально не возбуждено. Его цепь возбуждения через нижние контакты нечетных реле-счетчиков и верхний контакт реле передачи P получает питание после возбуждения реле P , которое остается возбужденным в течение всей передачи. Если импульсы короткие, то удлинительные цепи нечетных и четных импульсов через верхние контакты удлиняющих реле $1D$ и $2D$ не получают питания и реле T отпускает якорь после возбуждения соответствующего нечетного счетчика. Так как нижний контакт реле T включен в линейную цепь, здесь не показанную, состоящую из последовательно-соединенных линейной батареи, линейных реле центрального и управляемого пунктов и нижнего контакта реле T другого пункта, — возбуждение реле T вызывает размыкание линейной цепи. Иными словами, производится передача первого импульса. Первый импульс отсчитывается счетчиком 1. Таким образом реле T отпускает якорь после того, как ведущий передачу пункт зафиксирует передающийся импульс. Отпускание якоря реле T замыкает линию, и линейные реле возбуждаются. Происходит передача второго импульса. При втором импульсе возбуждается счетчик 2 и выключает счетчик 1, нижний контакт которого снова замыкает цепь возбуждения реле T . Реле T возбуждается снова — передается третий импульс. При передаче следующих коротких импульсов работа реле T происходит так же, как описано выше. При передаче длинных нечетных импульсов реле T получает дополнительное питание по удлиняющей цепи через верхний контакт реле $1D$ (до его отпадания) и шунтируется через верхний контакт реле $2D$ (до его отпадания) при передаче длинных четных импульсов.

Таким образом характер импульсов определяется тем, подается или не подается питание на удлинительные цепи через верхние контакты передающих групповых реле PG при соответствующих импульсах, отсчитываемых реле-счетчиками 4, 5, 6...

Схема выбора пункта показана на рис. 3.

Выбор пункта характеризуется определенной комбинацией из контактов реле $2T$ и $3T$. В данном случае могут быть осуществлены четыре комбинации — иначе говоря, схема рассчитана на четырьмя управляемых пункта. Действие происходит так, что во время прохождения кода (замкнут верхний контакт MP), при условии

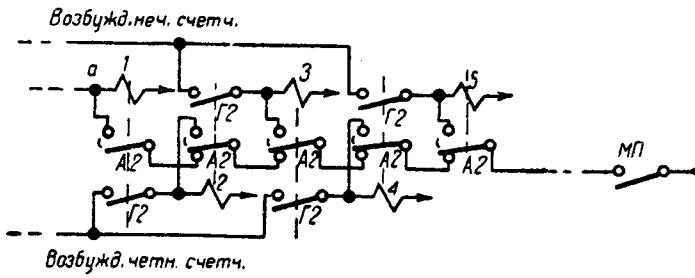


Рис. 1. Реле-счетчики

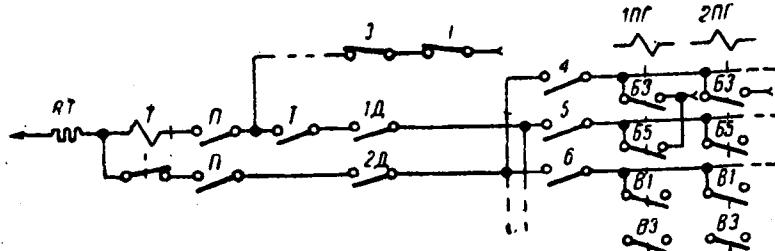


Рис. 2. Генерация импульсов

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

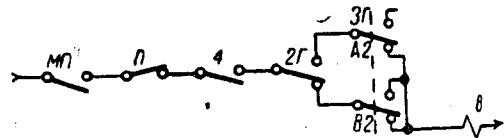


Рис. 3. Выбор пункта

приема (замкнут нижний контакт местного реле передачи P) и в конце серии импульсов, пред назначенной для выбора пункта (замкнут верхний контакт реле-счетчика 4), данный пункт не исключается из приема передачи только в том случае, если не возбуждается выключающее реле B . В нашем случае (рис. 3) это будет при условии возбуждения к моменту прохождения четвертого импульса реле $2G$ и $3G$. Пункты, у которых к моменту прохождения четвертого импульса оказалась набранной комбинация, не соответствующая данному коду, выключаются и в дальнейшей работе не участвуют.

Выбор группы (рис. 4) как в центральном, так и в управляемом пунктах также осуществляется посредством комбинационного метода. При выполнении условий, необходимых для правильного приема, замкнуты контакты реле M , PR , 6 и B , в конце кода, через набранную комбинацию из контактов реле $4G$ и $5G$ возбуждается соответствующее групповое реле OY в управляемом пункте или OY в центральном.

Цепи управления объектами управляемого пункта (рис. 5) нормально отключены от местных, оперативных цепей на верхних контактах групповых реле OY . Реле OY возбуждается в конце управляющего кода и подключает цепи управления обслуживаемых им объектов, в данном случае 5 объектов.

Характер операции — включить или отключить, определяется положением контактов реле I , которым соответствуют определенные объекты в выбранной группе и которые занимают определенное положение в соответствии с принятым управляющим кодом, к моменту возбуждения реле OY . Подача управляющего импульса происходит только после замыкания усиленного контакта реле Y , которое возбуждается после возбуждения реле OY . Реле Y обеспечивает управляющий импульс такой длительности, как это необходимо. Затем оно отпускает свой якорь. Только после этого отпускают якоря сначала реле OY , а затем и I , если они были возбуждены, чем и заканчивается операция управления в управляемом пункте.

После того как произошло изменение состояния управляемого объекта, срабатывает соответствующее ему контрольное реле (например IK , рис. 6), которое на мгновение рвет цепь обслуживающего его реле изменения состояния IS , якорь которого нормально притянут, так как оно получает питание через свой верхний контакт. Вследствие этого реле IS отпускает якорь и вызывает передачу известительного кода. Возбужда-

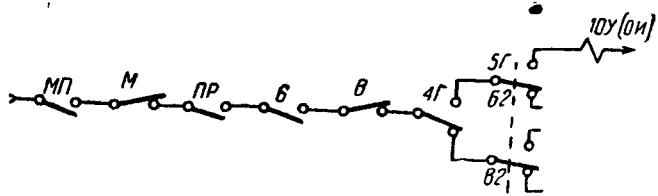


Рис. 4. Выбор группы

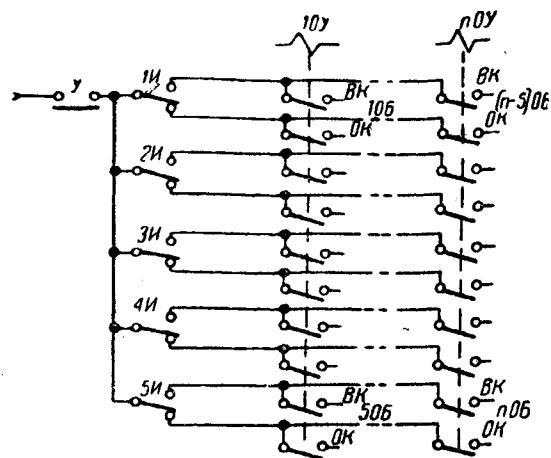


Рис. 5. Управляющие цепи

ется снова оно после передачи импульсов выбора группы через верхний контакт реле PR .

В результате прохождения известительного кода в центральном пункте, при включенных объектах группы, вызвавшей передачу, возбуждаются соответствующие промежуточные реле I (рис. 7) и при возбуждении группового реле OY подают полюс батареи на обмотку соответствующих реле K . Возбудившись, контрольное реле переходит на питание по поддерживающей цепи через свой верхний контакт и сопротивление R и после отпадания якоря реле OY удерживает свой якорь в притянутом положении.

Как нетрудно видеть, если бы при возбуждении реле OY реле I было бы не возбуждено, то реле K имело бы минус батареи с двух сторон обмотки, если же оно было бы возбуждено, оно отпустило бы свой якорь.

После возбуждения реле K (рис. 8) горевшая мигающим светом лампа отключенного положения OK (при условии, что ключ был поставлен в положение BK) по цепи: шина мигающего света M , верхний контакт ключа $A5$, лампа OK и нижний контакт реле K , — гаснет и загорается ровным светом лампы включенного положения BK .

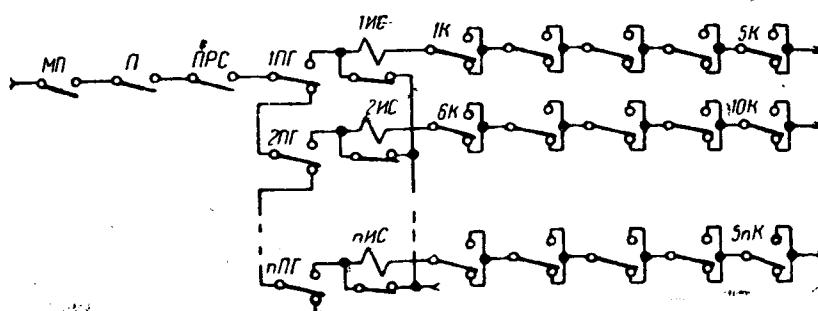


Рис. 6. Цепи реле изменения состояния

Вологодская областная универсальная научная библиотека

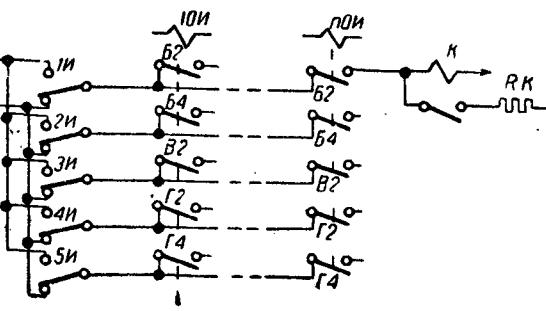


Рис. 7. Цепи управления контрольными реле

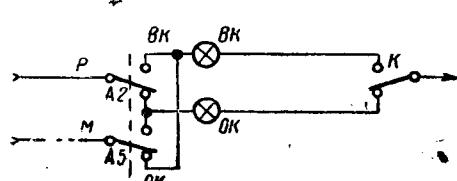


Рис. 8. Включение сигнальных ламп.

по цепи: шине ровного света P , верхний контакт ключа A_2 , лампа V_K и верхний контакт реле K .

Для заряда батарей применены купроокисные выпрямители типа $KTB-1$.

Питание осуществляется по способу непрерывный заряд-разряд (рис. 9). Ток, отдаваемый выпрямителями, устанавливается такой, чтобы компенсировать ток, потребляемый установкой, и ток саморазряда батареи. Ток, отдаваемый выпрямителями, может регулироваться посредством магнитных шунтов трансформаторов. Обычно положение шунтов приходится менять во время наладки установки и после аварии в системе переменного тока, так как во время аварии всю нагрузку принимает батарея и поэтому после ликвидации аварии приходится форсировать заряд. Гнезда $A_1 - A_5$ и $V_1 - V_3$ сделаны для удобства регулировки.

На рис. 10 изображен пульт управления настольного типа. Каждому управляемому масляному выключателю соответствует панелька с ключом и двумя сигнальными лампами. Левое положение ключа соответствует отключенному масляному выключателю, а правое — включенному. При этом горит ровным светом соответствующая сигнальная лампа. При несоответствии положе-

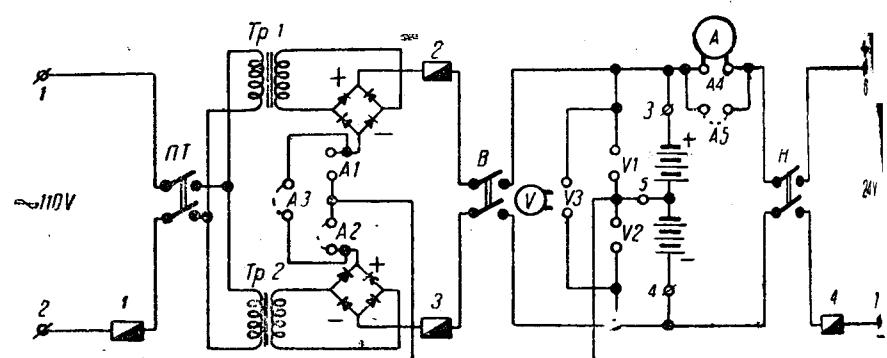


Рис. 9. Схема зарядного устройства

ний ключа и масляного выключателя горит мигающим светом лампа действительного положения масляного выключателя.

Положение разъединителей сигнализируется горением или негорением соответствующих ламп, встроенных в схему.

В верхних левом и правом углах пульта находятся местные сигналы, необходимые для наблюдения за правильностью действия устройств. Две лампы посередине, вверху, сигнализируют состояние источников питания на управляемом пункте. Внизу имеются лампы сигнализации появления земли и наличия напряжения на шинах.

Сигнальные лампы нормально не горят. Они зажигаются либо посредством специальной кнопки, если это потребовалось оператору, либо автоматически при приходе известительного кода. После того как надобность в сигнализации миновала, сигнализация гасится нажатием другой кнопки.

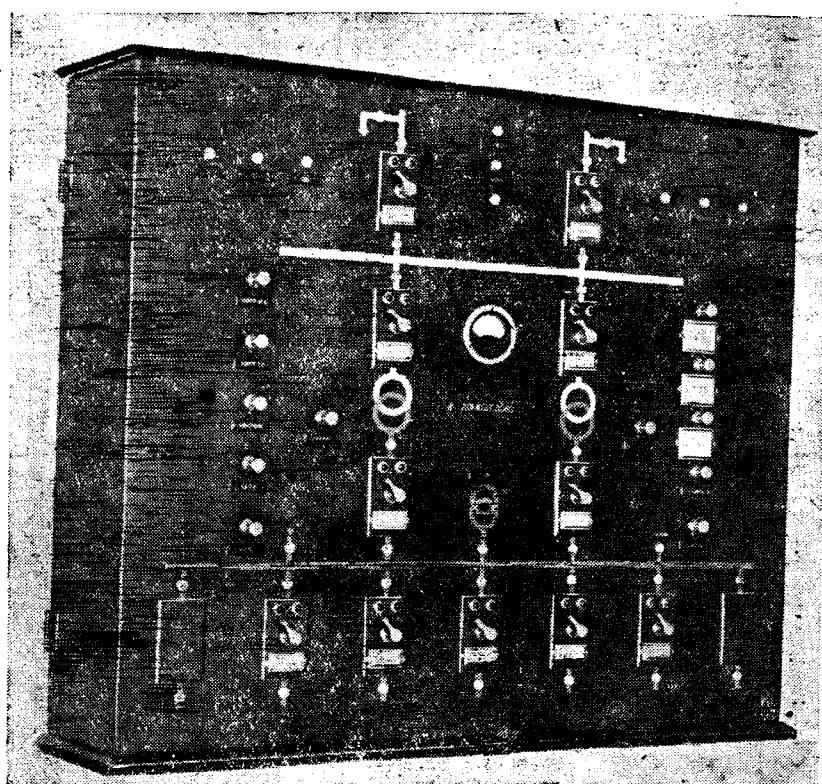


Рис. 10. Пульт управления

Волгододская областная универсальная научная библиотека

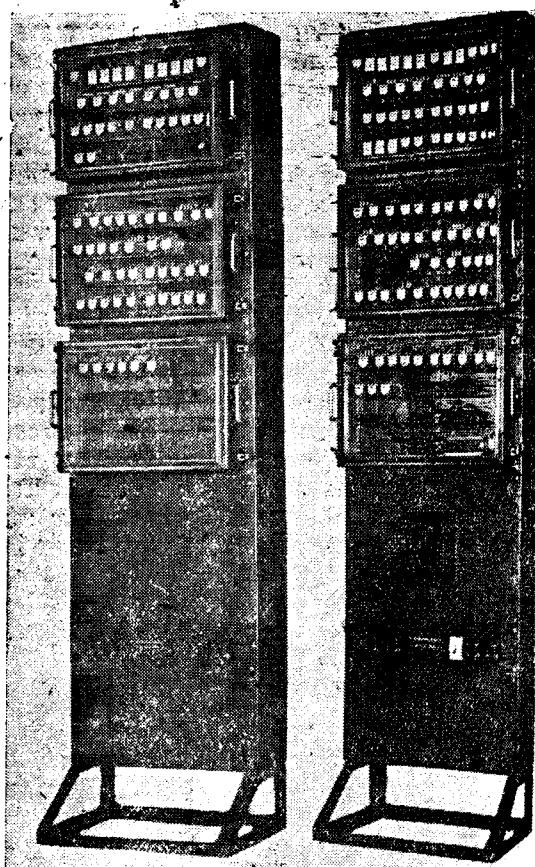


Рис. 11. Релейные стены

Все оперативные кнопки находятся с правой стороны пульта, а вспомогательные — с левой. Операция управления совершается следующим образом. Нажатием кнопки зажигаются сигнальные лампы. Затем поворачивается ключ управляемого масляного выключателя. Горевшая ровным светом лампа положения масляного выключателя начинает мигать. При этом звонит также и звонок.

Затем нажимается пусковая кнопка, под которой имеется надпись управляемого выключателя. Приходит в действие устройства телеуправления и происходит передача управляющего кода, которая длится около 3,5 сек.

В любое время до окончания передачи операцию можно отменить нажатием специальной кнопки.

После прихода известительного кода горевшая мигающим светом лампа гаснет и загорается ровным светом лампа нового положения выключателя. Звонок перестает звонить. Схема может быть погашена.

При приходе извещения об автоматическом отключении выключателя схема зажигается автоматически, причем лампа отключенного положения этого выключателя начинает мигать и звонит звонок. Устройства приводятся в нормальное состояние поворотом ключа выключателя, изменившего положение, и нажатием кнопки гашения схемы.

На рис. 11 показаны релейные стенды: слева — стенд центрального пункта, справа — стенд управляемого пункта. На стендах размещены реле для управления и контроля положения 11 масляных выключателей, контроля положения 16 разъединителей и 4 дополнительных сигналов с управляемого пункта. Предусмотрено также запасное место на случай расширения.

Щиток для заряда батареи посредством купророковых выпрямителей показан на рис. 12. Трансформаторы с подвижными магнитными шунтами расположены внизу.

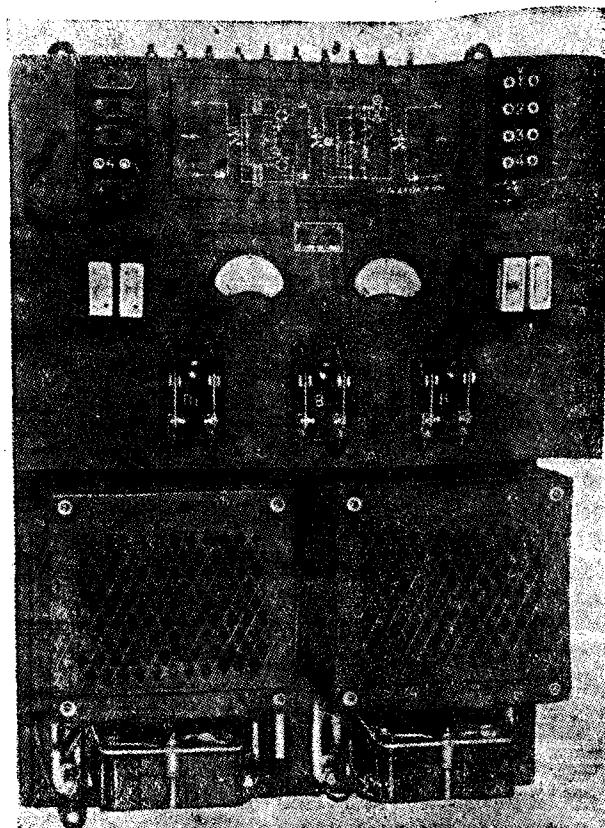
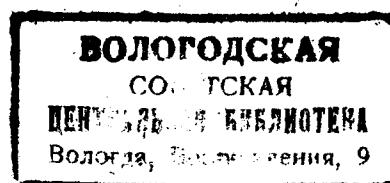


Рис. 12. Щиток для заряда батарей

Описанная аппаратура телеуправления с успехом может быть применена для управления электрическими понизительными и распределительными подстанциями, подстанциями электрифицированных железных дорог и трамвая, различного рода преобразовательными подстанциями, электрическими подстанциями больших заводов, различными насосными и компрессорными установками и другими подобными устройствами.



О скорости восстановления напряжения на контактах выключателей

И. М. Вальтер
Донэнерго

В статье¹ «Определение скорости восстановления напряжения на контактах выключателей при гашении дуги» Машкиллейсон предлагает для нахождения операционного выражения восстанавливавшегося напряжения в цепях с сосредоточенными постоянными алгебраическое решение системы операционных уравнений, составленных для каждого электрического контура в отдельности.

При этом восстанавливавшееся напряжение промышленной частоты он распределяет между всеми индуктивностями, из которых состоял контур к. з., пропорционально падению напряжения в них во время к. з.

Таким образом каждую из индуктивностей он рассматривает как генератор.

Практика расчетов скорости восстановления напряжения по методу Машкиллейсона показала, что для сложных цепей и, следовательно, при большом количестве уравнений данный метод приводит к громоздким алгебраическим преобразованиям даже при пользовании детерминантами.

Ниже приводится формула, с помощью которой необходимое выражение в операционной форме может быть написано сразу без составления и решения каких-либо уравнений.

Переходим к ее выводу.

Явление восстановления напряжения может быть рассматриваемо следующим образом: начиная с момента размыкания контактов выключателя, на них проявляется какое-то напряжение e_C .

Рассматривая остальную часть схемы как внешнюю сеть с эквивалентным, устанавливающимся импедансом Z_a , выражение для которого несложно составить для любой из схем, можно считать, что под действием напряжения e_C в эту сеть будет посыпаться ток

$$i = -\frac{e_C}{Z_a}. \quad (1)$$

Величина этого тока, чтобы не нарушать фи-

продолжала гореть. При этом, накладываясь, оба тока в сумме дадут нуль. Величина тока к. з. может быть выражена формулой:

$$i_{k.z} = \frac{E_{\max}}{\omega L_9} \sin \omega t, \quad (2)$$

где E_{\max} — восстанавливющееся напряжение промышленной частоты;

L_9 — эквивалентная индуктивность схемы;
 t — время в сек, отсчитываемое с момента перехода тока через нуль, т. е. с момента, соответствующего гашению дуги и началу рассматриваемого процесса.

Для малых углов ($t < 200 \mu$ сек) можно считать $\sin \omega t = \omega t$, и тогда из (2)

$$i_{k.z} = \frac{E_{\max}}{\omega L_9} \omega t = \frac{E_{\max}}{L_9} t = \frac{E_{\max}}{p L_9}, \quad (3)$$

где p — оператор Хивисайда.

Из (1) и (3), учитывая, что $i + i_{k.z} = 0$, получаем:

$$e_C = \frac{Z_a}{p L_9} E_{\max}. \quad (4)$$

Полученная формула является основной при решении всех схем с сосредоточенными постоянными.

В качестве примера на применение формулы (4) решим схему рис. 1. На схеме L_1 , L_2 и L_3 — некоторые индуктивности; C — емкость и Z — волновое сопротивление одной или нескольких линий бесконечной длины.

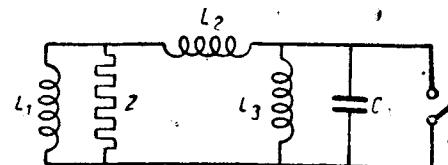


Рис. 1

Прежде всего вычисляем Z_a .

Имеем:

$$Z_a = Z_4 = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = \frac{p^2 L_1 L_2 L_3 + p (L_1 + L_2) L_3 Z}{p^3 L_1 L_2 L_3 C + p^2 (L_1 + L_2) L_3 Z C + p L_1 (L_2 + L_3) + (L_1 + L_2 + L_3) Z};$$

зической картины явления, должна быть равна и противоположна по знаку току к. з., который протекал бы через выключатель, если бы дуга

$$L_9 = \frac{(L_1 + L_2) L_3}{L_1 + L_2 + L_3}.$$

Применяя формулу (4), находим:

$$e_C = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{L_1 + L_2} \cdot \frac{p L_1 L_2 + (L_1 + L_2) Z}{p^3 L_1 L_2 L_3 C + p^2 (L_1 + L_2) L_3 Z C + p L_1 (L_2 + L_3) + Z (L_1 + L_2 + L_3)}.$$

¹ Сборник «Высоковольтное аппаратостроение», 1935.
Изд. ОНТИ.

Для схем с большим числом параметров упрощение вычислений при пользовании формулой (4) еще более значительно.

Данный метод может быть также применен и к решению схем с распределенными постоянными. Рассмотрим, например, задачу, разбираемую в разделе V вышеупомянутой статьи Машкиллайсона: от шин подстанции отходит линия конечной длины, разомкнутая на конце. Выключатель на одном из фидеров подстанции разрывает дугу. Прочие фидера выключены. Требуется определить скорость восстановления напряжения на контактах выключателя. Эта задача в общем виде Машкиллайсоном не решена, так как в начальном импедансе Z_1 он учитывает лишь индуктивность. Мы исходим из следующего. Общие выражения для напряжения и тока в какой-либо точке линии имеют следующий вид²:

$$E_x = U_a e^{-\gamma x} + U_b e^{\gamma x}; \quad (5)$$

$$I_x = \frac{U_a}{Z} e^{-\gamma x} - \frac{U_b}{Z} e^{\gamma x}. \quad (6)$$

$$e_C = \frac{E_m Z Z_a}{p L_s (Z + Z_a)} \left[1 + (1 + \mu_a) e^{-\frac{2\lambda}{v} p} + \mu_a (1 + \mu_a) e^{-\frac{4\lambda}{v} p} \right]. \quad (14)$$

Здесь x — расстояние данной точки от начала линии;
 U_a и U_b — некоторые величины (постоянные интегрирования) и не зависящие от x ;
 Z — волновое сопротивление линии;
 γ — коэффициент распространения.

Если пренебречь искажением и затуханием волн в линии (как это делает Машкиллайсон), то

$$\gamma = \frac{1}{v} p,$$

где v — скорость распространения волн.

Восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя получается из формулы (5), если положить $x = 0$:

$$e_C = E_{x=0} = U_a + U_b. \quad (7)$$

Ток, возникающий под действием этого напряжения, равный и противоположный току к. з., состоит из двух составляющих: тока, проходящего через Z_a , и тока, текущего в линии. Таким образом имеем:

$$\frac{e_C}{Z_a} + I_{x=0} = i_{k,z} \neq \frac{E_m}{p L_s}, \quad (8)$$

или, учитывая (6) и (7):

$$\frac{U_a + U_b}{Z_a} + \frac{U_a - U_b}{Z} = \frac{E_m}{p L_s}. \quad (9)$$

Для нахождения величин U_a и U_b нам необходимо иметь еще одно уравнение. Его мы получим из условия, что линия разомкнута на конце и, следовательно,

$$I_x = \frac{U_a}{Z} e^{-\gamma x} - \frac{U_b}{Z} e^{\gamma x} = 0, \quad (10)$$

где λ — длина линии.

Итак,

$$U_b = U_a e^{-2\gamma\lambda}. \quad (11)$$

Решая уравнения (9) и (11), находим:

$$U_a = \frac{E_m Z Z_a}{p L_s (Z + Z_a)} \frac{1}{1 - \mu_a e^{-2\gamma\lambda}}; \quad (12)$$

$$U_b = \frac{E_m Z Z_a}{p L_s (Z + Z_a)} \frac{e^{-2\gamma\lambda}}{1 - \mu_a e^{-2\gamma\lambda}}, \quad (13)$$

где для краткости положено

$$\frac{Z_a - Z}{Z_a + Z} = \mu_a.$$

Складывая равенства (12) и (13) и заменяя γ его значением, получаем:

По теореме запаздывания³ ($n+1$ -й член данного разложения для времен, меньших $\frac{2n\lambda}{v}$, равен нулю. Поэтому для линий средней длины (большей 10 km), рассматривая процесс лишь в течение первых 200 μ sec, можно ограничиться тремя первыми членами разложения.

Итак, имеем:

$$\frac{e_C}{E_m} = V_0 + V_1 e^{-\alpha p} + V_2 e^{-2\alpha p}, \quad (15)$$

где $\alpha = \frac{2\lambda}{v}$ — время пробега волны в оба конца линии.

$$V_0 = \frac{Z}{p L_s} \frac{Z_a}{Z + Z_a}; \quad (16)$$

$$V_1 = V_0 \cdot (1 + \mu_a) = \frac{2L}{Z} \cdot \frac{1}{p} (p V_0)^2; \quad (17)$$

$$V_2 = V_1 \mu_a = \frac{2L_s}{Z} p V_0 V_1 - V_1. \quad (18)$$

Выражение V_0 в функции t находится с помощью теоремы разложения Хивисайда. Общий вид функции:

$$V_0 = \Phi(t) = 1 - \sum_{i=1}^n a_i e^{-\alpha_i t}, \quad (19)$$

где a_i и α_i ($i = 1, 2, \dots, n$) — постоянные, действительные или комплексные числа.

Применяя к выражению (18) теорему умножения⁴, находим:

$$V_1 = \frac{2L_s}{Z} \left[\sum_{i=1}^n a_i^2 a_i^2 e^{-\alpha_i t} \int_0^t d\tau + \sum_{i=1}^n a_i a_i \sum_{k=1}^n a_k a_k e^{-\alpha_k t} \int_0^t e^{(\alpha_k - \alpha_i)\tau} d\tau \right], \quad (20)$$

где $k \neq i$.

² Карсон, Электрические нестационарные явления и операционное исчисление, 1934, стр. 156.

³ Цитированная работа Карсона, стр. 57.

⁴ Карсон, стр. 54.

Интегрируя и собирая члены с множителем $e^{-\alpha_i t}$ будем иметь:

$$m_i = 2 \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \alpha_k}{\alpha_k - \alpha_i} (k \neq i), \quad (21)$$

где для краткости обозначено:

$$q_i = \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \alpha_k}{(\alpha_i - \alpha_k)^2} [\alpha_i \alpha_k (\alpha_i - \alpha_k) + + (\alpha_i - \alpha_k) (\alpha_i m_i + \alpha_k m_k)] (k \neq i). \quad (24)$$

Итак, мы нашли выражения для V_0 , V_1 и V_2 . Подставляя их в разложение (16) и применяя

$$V_1 = \frac{2L_s}{Z} \sum_{i=1}^n a_i \alpha_i e^{-\alpha_i t} (m_i + a_i \alpha_i t) = F(t). \quad (22)$$

Подобным же образом для V_2 получаем:

$$V_2 = \frac{4L_s^2}{Z^2} \sum_{i=1}^n a_i \alpha_i e^{-\alpha_i t} \left[a_i \alpha_i^2 \left(a_i - \frac{3}{2} m_i \right) t - \frac{a_i^2 \alpha_i^2 t^2}{2} + q_i \right] - F(t) = f(t), \quad (23)$$

к каждому члену разложения теорему запаздывания (см. выше), будем иметь:

$$\frac{eC}{E_m} = \Phi(t) I_0 + F(t - \alpha) I_\alpha + f(t - 2\alpha) I_{2\alpha}, \quad (25)$$

где функции $\Phi(t)$, $F(t)$ и $f(t)$ вычисляются при помощи формул (20), (23) и (24). (Здесь I_k — функция, равная нулю при $t < k$ и единице при прочих значениях t .)

Распределение напряжения между отдельными разрывами выключателя

А. Я. Буйлов
ВЭИ

В начале развития высоковольтных выключателей многие заграничные фирмы (BBC, Delle и др.) выпускали выключатели с многократным разрывом, причем число разрывов доходило до 14 на фазу. В связи с появлением камер масляного дутья, дейонных решеток и прочих усилий приспособлений, выключатели с многократным (более двух) разрывом стали производиться уже в значительно меньшем масштабе. Однако последние сверхмощные выключатели на 287 кВ для станции Боулдер-Дам (Америка) выполнены с 8- и 10-кратным разрывом на фазу.

Для выключателей с многократным разрывом вопрос о распределении напряжения между отдельными разрывами имеет большое значение, так как от этого распределения зависит степень участия отдельных разрывов в работе выключателя и, следовательно, качество выключателя в целом. Когда дуговой промежуток окончательно дейонизируется, напряжение, приложенное к выключателю, распределяется между отдельными разрывами соответственно величинам емкостей относительно земли каждого из них и емкостей

между ними. За время нестационарного процесса напряжения на выключателе, когда проводимость дугового промежутка не равна нулю, такое распределение уже не будет иметь места.

В то же время именно этот промежуток времени является решающим для нового зажигания дуги и характер распределения напряжения между отдельными разрывами в этот отрезок времени имеет наиболее важное значение, так как он позволит судить, в какой степени участвует тот или иной разрыв в гашении дуги.

С целью освещения этого вопроса, в 1936 г. в ВЭИ были поставлены опыты с гашением дуги под маслом при двухкратном разрыве. В качестве объекта для исследований был взят выключатель производства завода «Электроаппарат» ВМ-14. Эксперименты велись не только для простого разрыва контактов под маслом, но и для общей камеры масляного дутья, насыженной на одну из фаз выключателя. Схема испытаний приведена на рис. 1. На схеме G — 6,6-кВ генератор, 1300 кВА; L — воздушный реактор; A и B — первый и второй разрывы масляного выключателя; C_1 и C_2 — емкости, шунтирующие на землю оба разрыва или один из них. Напряжение фиксировалось на всем выключателе U_{AB} и на траверзе выключателя U_B . C_A и C_B — емкостные делители напряжения. Схема синхронизации работы катодного осциллографа на рис. 1 не показана. Она аналогична примененной нами [1] для записи тока и напряжения в дуговом промежутке. Расстояние между контактами к моменту работы катодного осциллографа было 8–23 мм. При опытах с общей камерой масляного дутья разрыв B был удален от выхлопного отверстия, так что струя масла действовала на дугу в разрыве A .

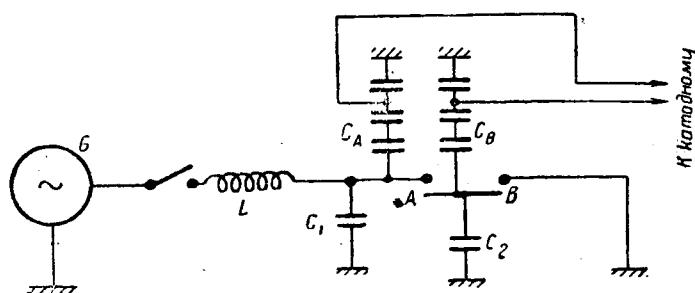


Рис. 1

Вологодская областная универсальная научная библиотека

Чтобы свести к минимуму влияние емкостей проводов выключателей, измерительной проводки и прочих трудно учитываемых емкостей, величина емкостей C_1 и C_2 бралась или равной нулю или $0.02 \mu F$. Поэтому мы могли считать, что емкости на отдельных разрывах практически равны между собой (когда $C_1 = C_2$), или одна значительно больше другой (когда одна равна 0, а другая $0.02 \mu F$).

Основные данные опытов сведены в таблицу. В таблице $n\% = \frac{U_B}{U_{AB}} \cdot 100$ — дает относительную величину напряжения на разрыв B . Для многих опытов величины исследуемых напряжений получались для моментов всплеска тока [1, 2]. В этом случае величина n подсчитывалась для каждого отдельного подъема напряжения (для каждого всплеска), а в таблице дан диапазон колебаний этой величины для данной осциллограммы.

Таблица *

№ опыта	C_1 μF	C_2 μF	Конструкция	$n\%$
1.	0,02	0	Масл. дутье	27
2.			"	11
3.			"	3
4.	0		Простой разрыв	40-55
5.			"	28-36
6.			"	86
7.			"	20-40
8.			"	30-50
9.			"	Около 80
10.	0,02		"	60
11.			"	65
12.	0,02		"	70-80
13.			"	90
14.			"	30
15.			"	60
16.		0	"	43-39
17.			"	22-50
18.			"	24-52
19.			"	60-97
20.	0,02		"	50-98
21.			"	54-93
22.	0		"	40
23.			"	18
24.		0	"	10-64
25.			"	15-30
26.			Масл. дутье	15
27.	0,02		"	19
28.		0,02	"	60-95
29.			"	80

* $L = 0,11 \text{ H}$.

Из таблицы видно, что величина n для простого разрыва под маслом колеблется в очень широких пределах: от 5 до 98%, т. е. иногда почти все напряжение приходится на один из разрывов, причем этот разрыв может быть и первым и вторым. Это доказывает, что распределение напряжения между разрывами зависит от проводимостей их дуговых промежутков. Проводимости же промежутков в значительной степени связаны с некоторыми случайными факторами и могут колебаться в очень широких пределах.

Для камеры масляного дутья в большинстве случаев напряжение U_B меньше U_A , что объясняется наличием дутья в разрыве A . Влиянием проводимости дугового промежутка вполне объ-

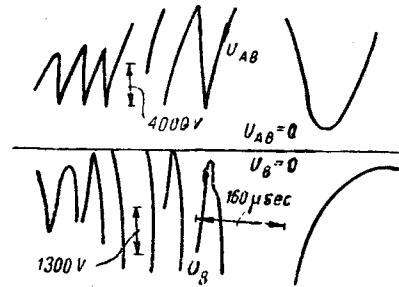


Рис. 2

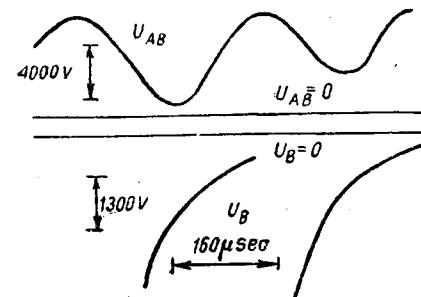


Рис. 3

ясняется тот факт, что распределение напряжения зависит от того, в какой момент (относительно момента окончательного гашения) мы его фиксируем.

На рис. 2 и 3 представлены осциллограммы (простой разрыв под маслом), снятые при одинаковых и тех же условиях ($C_1 = 0,02 \mu F$; $C_2 = 0$; $L = 0,11 \text{ H}$).

Момент съемки осциллограммы рис. 2 совпадает с моментом появления всплесков тока в дуговом промежутке, и в начале процесса формы кривых напряжения U_{AB} и U_B очень схожи между собой. Затем всплески тока прекращаются и кривые сильно разнятся друг от друга. Изменения напряжения на обоих разрывах после окончания всплесков тока и окончательного гашения даны на рис. 3. Здесь кривая U_{AB} представляет нормальные собственные колебания цепи, обусловленные, в основном, емкостью C_1 и индуктивностью реактора. Напряжение же U_B представляет собой последовательные зарядку и разрядку емкости второго разрыва и емкости измерительных проводов на этот дуговой промежуток, причем емкости заряжаются через разрыв A , сопротивление которого больше сопротивления разрыва B . Как видно из рис. 3, в начале заряд емкостей, связанных с разрывом B , происходит примерно с той же скоростью, что и разрядка их на промежуток B , затем время заряда несколько меньше времени разряда.

Это можно объяснить изменением сопротивлений дуговых промежутков обоих разрывов и тем, что во время разряда емкости разрыва B продолжают питаться током через разрыв A .

Различие кривых U_{AB} и U_B подтверждает тот факт, что сопротивление разрыва A больше, чем B . Это явление интересно еще тем, что оно наблюдается уже после того, как дуга окончательно потухла и напряжение на выключателе находится уже в стадии затухания собственных колебаний цепи. Это обстоятельство, с одной

стороны, подтверждает правильность наших прежних выводов о длительности процесса деионизации, которая оказалась значительно больше времени первого подъема напряжения на выключателе [2], а с другой — указывает на то, что если напряжение на промежутке и достигло нормального синусоидального вида, это еще не значит, что промежуток полностью деионизировался и в нем могут еще продолжать протекать токи.

На рис. 4 приведена осциллограмма, заснятая при $C_1 = 0,02 \mu F$; $C_2 = 0$ (простой разрыв под маслом). Здесь мы имеем как бы конец процесса, представляемого рис. 3. Емкость у разрыва B зарядилась здесь последний раз.

На рис. 5 представлена осциллограмма для тех же условий, что и осциллограммы рис. 4, но для случая, когда процесс в дуге оканчивается новым зажиганием; здесь уже кривые U_{AB} и U_B очень схожи между собой. Это значит, что сопротивление промежутка A не больше сопротивления промежутков B .

На рис. 6 приведена осциллограмма, заснятая при условиях $C_1 = C_2 = 0,02 \mu F$. На этой осциллограмме дана интересная кривая U_B : в то время как U_{AB} представляет собой приблизительно синусоиду, U_B — ступенчатая кривая, имеющая некоторую впадину при максимуме U_{AB} . Это значит, что сопротивление промежутка B при увеличении напряжения на нем падает несколько быстрее, чем у промежутка A . Поэтому при увеличении напряжения у A по синусоиде — напряжение у B поддерживается приблизительно постоянным. На рис. 7 приведена осциллограмма, заснятая при тех же условиях, что и осциллограмма для рис. 6, но

для камеры масляного дутья. Здесь кривая имеет значительно больше ступеней, чем на предшествующей осциллограмме. Это, однако, не связано с конструкцией масляного дутья, так как на рис. 8 приведена осциллограмма, снятая при тех же условиях, но у нее протяженность ступеней кривой U_B того же порядка, что и на осциллограмме рис. 6.

Недавно в литературе [3] появилась интересная работа Flursheim, который исследовал распределение напряжения между двумя разрывами выключателя с камерами cross-jet; исследование было проделано для 11-kV выключателя и выключателем на 33 kV. На рис. 9 представлены катодные осциллограммы a и b некоторых из этих опытов при 11 kV. В этих осциллограммах $A+B$ относится ко всему выключателю и индекс B — к заднему (от источника тока) разрыву, т. е. обозначения те же, что и в наших осциллограммах. Из рисунка видно, что и при этих опытах распределение напряжения получается далеко не равномерным.

Опыты Flursheim при 33 kV дали в общем ту же картину (n % порядка 15—40). Осциллограммы рис. 9 дают для n % значения 1 \div 16, причем очень показательно, что кривая U_B в опыте с током 4570 A имеет характер, отличный от кривой U_{AB} : хотя на кривой U_B и заметны колебания той же периодичности, что и U_{AB} , но их амплитуда очень мала и, кроме того, их ось сдвинута относительно нуля напряжения. Таким образом и при больших токах распределение напряжения между отдельными разрывами может быть не только неравномерным, но и такого же вида, как на рис. 6, 7, 8.

Таким образом на основании наших опытов с простым расхождением контактов под маслом и малыми токами (порядка 40 \div 60 A) и на основании

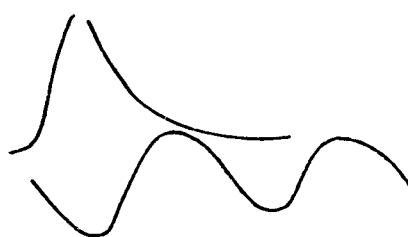


Рис. 4

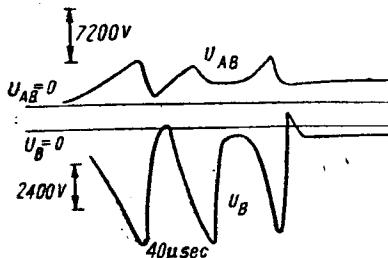


Рис. 5

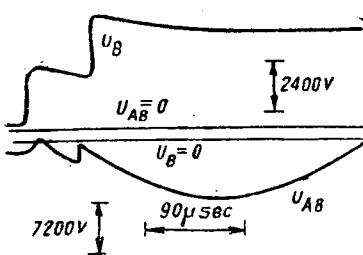


Рис. 6

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

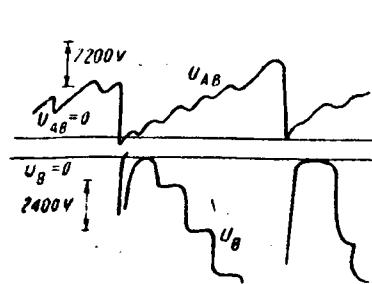


Рис. 7

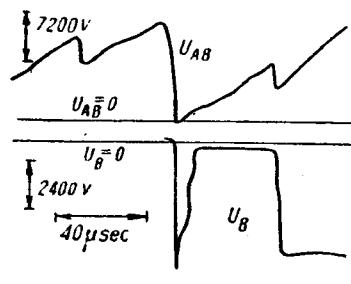


Рис. 8

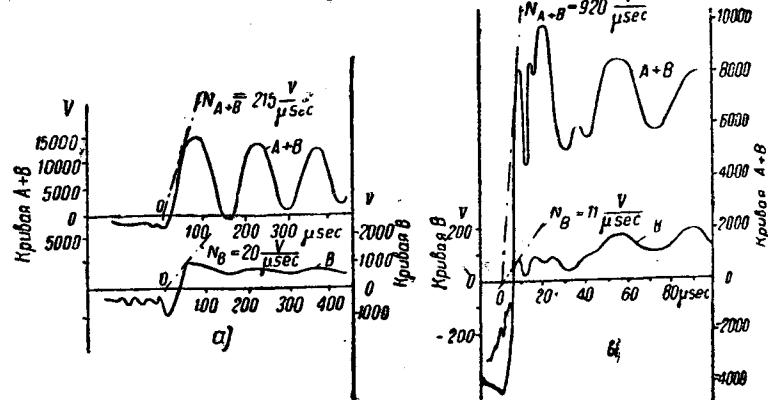


Рис. 9. а — при токе 4570 Aeff; б — 14 900 A

ных Flursheim с камерами cross-jet и большими токами можно заключить, что за время нестационарного процесса напряжение между отдельными разрывами выключателя распределяется неконо не равномерно и эта неравномерность обусловлена в основном характером распределения проводимостей в дуговом промежутке, а не емкостей. При этом неравномерность в распределении может достигать очень больших значений. Практически это значит, что строить выключатели с большим числом разрывов на фазу не имеет смысла, если только дугогасящее устройство выключателя не создает такого быстрого повышения сопротивления дугового промежутка, при котором это сопротивление получается очень большим и уже мало оказывается на распределении напряжения между отдельными разрывами. В последнем случае это распределение зависит от распределения емкостей и путем соответствующей экранировки или расположения отдельных мест разрыва можно получить приблизительно равномерное распределение напряжения между отдельными разрывами.

Таким образом выключатели с простым разрывом контактов под маслом выполнять с многочленным разрывом не имеет смысла. Это подтвердил и многолетний опыт эксплуатации этих выключателей. Поэтому как только появилась возможность отказаться от них (в связи с появлением модернизированных выключателей), конструкторы отказались от них.

В то же время, как уже указывалось выше, выключатели последнего выпуска на 287 кВ име-

ют 8 (фирма GEC) и 10 (фирма Вестингауза) разрывов на фазу. Однако эти выключатели имеют устройства для интенсивного и быстрого гашения дуги; это значит, что сопротивление дугового промежутка в них растет значительно быстрее, чем в обычных масляных выключателях и, следовательно, чисто конструктивным путем можно добиться более или менее равномерной работы отдельных мест разрывов, а в этом случае скорость гашения дуги растет с увеличением числа мест разрыва.

Относительно камер cross-jet, с которыми производил опыты Flursheim, следует заметить, что в этих дугогасящих приспособлениях дуга гасится в результате давления, создаваемого самой дугой. Эти камеры по своим дугогасящим свойствам, несомненно, уступают тем устройствам, где масляное дутье создается не той дугой, которая тушится; тем более они уступают устройствам, использующим для движения гасящей струи масла посторонний источник (привод), как это имеет, например, место в выключателе на 287 кВ фирмы GEC.

Другими словами, опыты Flursheim с камерами cross-jet не могут служить доказательством того, что в выключателях с интенсивным гашением дуги нельзя создать приблизительно равномерного распределения напряжения.

Литература

- Буйлов, "Электричество" № 14, 1937.
- Буйлов, "Электричество" № 1, 1936.
- Flursheim, JIIE of Japan № 476, 1937

Поведение индуктивного потребителя и компенсация сдвига фаз при несинусоидальном напряжении¹

П. Г. Городецкий

Киевский индустриальный институт

В статье исследуется поведение потребителя электроэнергии, обладающего активным сопротивлением R и индуктивностью L , при несинусоидальном напряжении, аналогично тому, как в нашей предыдущей работе [1] был исследован режим работы конденсатора при наличии высших гармонических в кривой напряжения.

Для намеченного анализа нам удобно сравнивать потребляемую кажущуюся мощность, ток и их активные и реактивные составляющие в двух случаях: 1) при синусоидальном напряжении и 2) когда напряжение изменяется по периодическому закону, отличному от закона синуса. В обоих случаях принимаем равными среднеквадратичные значения напряжения.

При рассмотрении второго случая примем, что мы имеем чистотерменное напряжение, т. е. положим, что постоянный член разложения кривой напряжения в ряд Фурье равен нулю. Тогда кривая напряжения определяется уравнением:

$$u_t = f(t) = \sum \sqrt{2} U_k \sin(k\omega t + \alpha_k). \quad (1)$$

Все величины, относящиеся к первому случаю, будем обозначать индексом o .

В дальнейшем будем следовать выводам S. Fruye [2] и W. Quade [3], согласно которым и при несинусоидальных

точках: 1) кажущаяся мощность и ее компоненты численно связаны как гипотенуза и катеты прямоугольного треугольника; 2) ток и его активная и реактивная составляющие численно связаны аналогично; 3) оба треугольника подобны, иначе говоря, и при несинусоидальных токах справедливы соотношения:

$$P_a^2 + P_r^2 = P^2; \quad I_a^2 + I_r^2 = I^2; \quad P_a = UI_a; \quad P_r = UI_r; \quad P = UI.$$

Активная мощность и активный ток. При синусоидальном напряжении активная мощность

$$P_{ao} = \frac{U^2}{R} \cos^2 \varphi_o; \quad (2)$$

активный ток

$$I_{ao} = \frac{U}{R} \cos^2 \varphi_o. \quad (3)$$

где

$$\varphi_o = \arctg \frac{2\pi f L}{R}. \quad (4)$$

Активная мощность, потребляемая при несинусоидальном напряжении, если пренебречь явлением скин-эффекта:

$$P_a = \sum P_{ak} = \frac{1}{R} \sum (U_k \cos \varphi_k)^2, \quad (5)$$

где

$$\varphi_k = \arctg \frac{k2\pi f L}{R}. \quad (4a)$$

¹ Из диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, защищенной автором 19/XII 1935 г. при Киевском индустриальном институте.

Вводя коэффициенты вида

$$a_k = \frac{U_k}{U},$$

имеем:

$$P_a = \frac{U^2}{R} \cos^2 \varphi_o \sum \left(\frac{a_k \cos \varphi_k}{\cos \varphi_o} \right)^2 \quad (6)$$

и соответственно

$$I_a = \frac{U}{R} \cos^2 \varphi_o \sum \left(\frac{a_k \cos \varphi_k}{\cos \varphi_o} \right)^2. \quad (7)$$

Сравнивая последние выражения с формулами (2) и (3) и обозначая

$$\gamma = \sum \left(\frac{a_k \cos \varphi_k}{\cos \varphi_o} \right)^2, \quad (8)$$

получаем:

$$P_a = P_{a_o} \gamma; \quad (9)$$

$$I_a = I_{a_o} \gamma. \quad (10)$$

Из равенства (9) и (10) следует, что при несинусоидальном напряжении потребляемые индуктивным потребителем активная мощность и активный ток всегда будут меньше, чем при синусоидальном напряжении равного эффективного значения, так как всегда $\gamma < 1$, потому что

$$\varphi_k > \varphi_{k-1} > \varphi_{k-2} > \dots > \varphi_2 > \varphi_1 = \varphi_o$$

и

$$U^2 = \sum U_k^2.$$

Кажущаяся мощность, полный ток и коэффициент мощности. Кажущаяся мощность и полный ток при синусоидальном напряжении будут:

$$P_o = \frac{U^2}{R} \cos \varphi_o; \quad (11)$$

$$I_o = \frac{U}{R} \cos \varphi_o. \quad (12)$$

При несинусоидальном напряжении, проводя анализ по предыдущему, получаем:

$$I = \sqrt{\sum I_k^2} = I_o \sqrt{\gamma} \quad (13)$$

и соответственно

$$P = P_o \sqrt{\gamma}. \quad (14)$$

Из последних выражений следует, что потребляемые активно-индуктивным приемником энергии полный ток и кажущаяся мощность при несинусоидальном напряжении меньше, чем при синусоидальном того же среднеквадратичного значения. Из формул (2), (11), (9) и (14) видно, что коэффициент мощности рассматриваемого потребителя при несинусоидальном напряжении

$$\lambda = \frac{P_a}{P} = \frac{\frac{U^2}{R} \cos^2 \varphi_o \gamma}{\frac{U^2}{R} \cos \varphi_o \sqrt{\gamma}} = \sqrt{\gamma} \cos \varphi_o$$

будет меньше, чем при синусоидальном равного эффективного значения:

$$\lambda_o = \frac{P_{a_o}}{P_o} = \frac{\frac{U^2}{R} \cos^2 \varphi_o}{\frac{U^2}{R} \cos \varphi_o} = \cos \varphi_o,$$

так как

$$\gamma < 1, \lambda < \lambda_o.$$

Реактивная мощность и реактивный ток. Для рассматриваемых двух случаев реактивную мощность и реактивный ток определим следующими выражениями:

$$P_{r_o} = \sqrt{P_o^2 - P_{a_o}^2} = \sqrt{\left(\frac{U^2}{R} \cos \varphi_o \right)^2 - \left(\frac{U^2}{R} \cos^2 \varphi_o \right)^2} = \\ = \frac{1}{2} \frac{U^2}{R} \sin 2\varphi_o; \quad (15)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека

$$I_{r_o} = \sqrt{I_o^2 - I_{a_o}^2} = \frac{1}{2} \frac{U}{R} \sin 2\varphi_o; \quad (16)$$

$$P_r = \sqrt{P_o^2 - P_a^2} = \sqrt{\left(\frac{U^2}{R} \cos \varphi_o \sqrt{\gamma} \right)^2 - \left(\frac{U^2}{R} \cos^2 \varphi_o \right)^2} = \\ = \frac{1}{2} \frac{U^2}{R} \sin^2 \varphi_o \sqrt{\gamma + \gamma(1-\gamma) \operatorname{ctg}^2 \varphi_o}; \quad (17)$$

$$I_r = \sqrt{I_o^2 - I_a^2} = \frac{1}{2} \frac{U}{R} \sin 2\varphi_o \sqrt{\gamma + \gamma(1-\gamma) \operatorname{ctg}^2 \varphi_o}. \quad (18)$$

Сопоставляя выражение (17) с выражением (15), а выражение (18) с выражением (16) и обозначая

$$h = \sqrt{\gamma + \gamma(1-\gamma) \operatorname{ctg}^2 \varphi_o}, \quad (19)$$

получаем:

$$P_r = P_{r_o} h; \quad (20)$$

$$I_r = I_{r_o} h. \quad (21)$$

Исследуем величину h , зависящую от относительного изменения кривой напряжения и от свойств потребителя:

$$h = F(\gamma, \varphi_o).$$

Нетрудно доказать, что функция h не имеет экстремума (будем искать экстремальные значения h^2 , соответствующие h).

Из формулы (19) имеем:

$$\frac{dh^2}{d\gamma} = 1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi_o (1-2\gamma) = 0; \quad \frac{dh^2}{d\varphi_o} = \\ = 2\gamma(\gamma-1) \frac{\operatorname{ctg} \varphi_o}{\sin^2 \varphi_o} = 0; \\ \frac{d^2 h^2}{d\gamma^2} = -2 \operatorname{ctg}^2 \varphi_o; \quad \frac{d^2 h^2}{d\varphi_o^2} = 2\gamma(\gamma-1) \frac{1+2\cos^2 \varphi_o}{\sin^4 \varphi_o}; \\ \frac{d^2 h^2}{d\gamma d\varphi_o} = (2\gamma-1) 2 \frac{\cos \varphi_o}{\sin^3 \varphi_o}.$$

Решая совместно первые два уравнения относительно γ и φ_o , получаем:

$$\gamma = 1; \quad \varphi_o = 45^\circ.$$

Подставляя эти значения γ и φ_o в выражения вторых производных, получаем:

$$\left(\frac{d^2 h^2}{d\gamma^2} \right) \left(\frac{d^2 h^2}{d\varphi_o^2} \right) - \left(\frac{d^2 h^2}{d\gamma d\varphi_o} \right)^2 = -16 < 0,$$

что свидетельствует о том, что $h = F(\gamma, \varphi_o)$ не имеет экстремума.

Дальнейшее исследование приводит к тому, что $h=1$ в двух случаях: 1) либо при любом значении φ_o и при $\gamma=1$, т. е. при синусоидальном напряжении; 2) либо, когда γ и φ_o связаны зависимостью:

$$\varphi_o = \operatorname{arctg} \sqrt{\gamma}.$$

Если $\varphi_o > \operatorname{arctg} \sqrt{\gamma}$, $h < 1$;

если $\varphi_o < \operatorname{arctg} \sqrt{\gamma}$, $h > 1$.

На основании вышеприведенного мы приходим к заключению, что при несинусоидальном напряжении потребляемые активно-индуктивным потребителем реактивная мощность и реактивный ток могут быть и больше и меньше и равны таковым в случае синусоидального напряжения равного среднеквадратичного значения.

Компенсация сдвига фаз активно-индуктивного приемника. Воспользуемся полученным здесь, результатами и некоторыми формулами, касающимися поведения конденсатора при несинусоидальном напряжении, выведенными нами ранее [1], для рассмотрения вопроса о компенсации сдвига фаз при несинусоидальном напряжении.

Предположим, что индуктивный потребитель имеет номинальную мощность P_{a_o} и номинальный коэффициент мощности $\lambda_1 \cos \Theta_1$; желаемый коэффициент мощности после ком-

искажении $-\lambda_2 \cos \Theta_2$. В общем случае, полагая кривую напряжения отличной от синусоиды, следует полагать, что потребитель забирает активную мощность, равную $P_{a_0} \gamma$ и активную $-P_{a_0} \operatorname{tg} \Theta_1 h$, а параллельно приключенная к нему для улучшения коэффициента мощности батарея конденсаторов потребляет активную мощность $U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \eta$ и реактивную мощность $-U^2 \omega C \beta$.

Тогда желаемый коэффициент мощности $\lambda_2 = \cos \Theta_2$ определяется как

$$\cos \Theta_2 = \frac{P_{a_0} \gamma + U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \eta}{\sqrt{(P_{a_0} \gamma + U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \eta)^2 + (P_{a_0} \operatorname{tg} \Theta_1 h - U^2 \omega C \beta)^2}}. \quad (22)$$

Решая последнее уравнение относительно C , получаем, что необходимая для требуемой компенсации сдвига фаз минимальная емкость определяется выражением:

$$C = \frac{P_{a_0}}{U^2 \omega} \frac{(h \operatorname{tg} \Theta_1 - \gamma \operatorname{tg} \Theta_2)}{\beta + \eta \operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \Theta_2}. \quad (23)$$

Если пренебречь потерями в конденсаторе, принять $\operatorname{tg} \delta = 0$ и, следовательно, $\beta = \phi$, получаем окончательно:

$$C = \frac{P_{a_0}}{U^2 \omega} \frac{(h \operatorname{tg} \Theta_1 - \gamma \operatorname{tg} \Theta_2)}{\phi}. \quad (24)$$

При синусоидальном напряжении $h = 1$; $\gamma = 1$; $\phi = 1$, формула (24) приводится к выражению:

$$C = \frac{P_{a_0}}{U^2 \omega} (\operatorname{tg} \Theta_1 - \operatorname{tg} \Theta_2). \quad (25)$$

Формулой (24) для практических расчетов нужно пользоваться в случае, когда кривая напряжения в силу тех или иных причин заметно искажена. При искажении кривой напряжения в пределах, допускаемых нормами, значения h , γ и β близки к единице, и выражения (24) и (25) приводят к практически одинаковому результату.

Пример. Примем: $P_{a_0} = 1000 \text{ kW}$; $U = 11 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$;

$$\lambda_2 = \cos \Theta_1 = 0,6; \cos \Theta_2 = 0,8.$$

Предположим, что кривая напряжения имеет форму, изображенную на рис. 1 нашей предыдущей работы [1]. Для такой формы кривой $\phi = 1,37$; $h = 0,99$; $\gamma = 0,955$ [величины h и γ подсчитаны при помощи формул (9), (20) и табл. 1 нашей предыдущей работы].

По формуле (25) получаем:

$$C = \frac{1000 \cdot (1,33 - 0,75)}{11^2 \cdot 314} \cdot 10^6 = 15,3 \mu\text{F}.$$

По формуле (24):

$$C = \frac{1000 \cdot (0,99 \cdot 1,33 - 0,955 \cdot 0,75)}{11^2 \cdot 314} \cdot \frac{1}{1,37} \cdot 10^6 = 11,5 \mu\text{F}.$$

Литература

1. Городецкий П. Г., Поведение конденсатора при несинусоидальном напряжении. „Электричество“ № 2, стр. 22, 1937.

2. S. Fryze, Wirk, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung. ETZ № 25, 26, 29, 1932.

3. W. Quade, Wirk, Blind- und Scheinleistung bei Wechselströmen mit beliebiger Kurvenform. A. f. E. № 2, 12, 1934.

0 магнитной индукции в любой точке зубцового деления электрических машин¹

О. В. Бенедикт

Завод „Динамо“ им. Кирова

В любом пазу электрической машины, кроме исследованного нами уже поперечного пазового потока, который на рис. 1 представлен силовыми линиями I , имеются по меньшей мере еще 4 пазовых потока: первый продольный поток (рис. 1, II) образуется благодаря тому, что главный поток даже при совершении ненасыщенных зубцах частично проникает в пазы. Второй поток возникает благодаря насыщению зубцов, и направление его в основном совпадает с направлением силовых линий II . Третий поток вступает из зазора в головку зубца через боковые стенки паза (силовая линия III) и, наконец, четвертый — это тот поток, который вследствие насыщения в нижней части зубца выходит из него в паз (силовая линия IV).

Величина и распределение этих потоков, имеющих большое значение для образования вихревых токов, очевидно, зависит от величин AW , Φ_t , Θ .

Вихревые токи можно подсчитать только лишь, когда точно известно изменение индукции во времени. В этой работе автор исследует эти зависимости с целью нахожде-

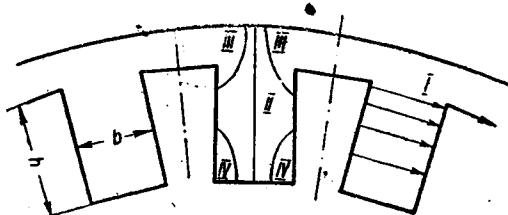


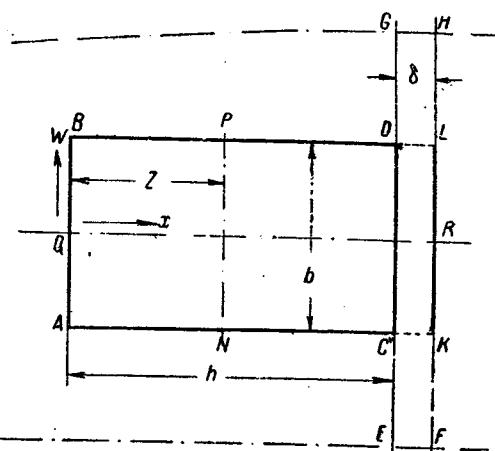
Рис. 1

¹ См. статьи автора в „Электричестве“ № 20 и 23, 1936 и № 3, 1937.

ния простых формул для распределения всех вышеперечисленных видов магнитных потоков. При этом строение этих формул должно быть таким, чтобы величины AW , Φ_t , Θ входили бы в них как коэффициенты, быстро определяемые номографическим путем.

Исследуем вначале пространственное распределение индукции внутри паза (рис. 2).

Действительный поток паза получается в результате совместного действия м. д. с. токов якоря и м. д. с., обусловленных прохождением главного магнитного потока. Эти два фактора создают вместе сложное состояние насыщения в зубце, и поэтому поток паза не может быть просто разделен на две части, зависящие от каждой из них. Но можно,



очевидно, разделить результирующий поток на два составляющих несколько с иной точки зрения. Магнитное напряжение обхода для искомого результирующего поля в пазу очевидно, будет таким же, как и для поля, которое имело бы место в пазу, если бы зубцы были не насыщены, а якорь находился бы под нагрузкой. Это последнее поле, как известно, может быть представлено с большой точностью в виде некоторого поперечного пазового потока, индукция которого нарастает линейно от дна паза вверх.

Мы в дальнейшем будем исследовать только ту слагающую потока, которая имела бы место, если бы ток якоря был равен нулю и насыщение зубцов было бы тем же самым, как и в действительности. При этом безразлично, вызывается ли это насыщение током или же главным потоком возбуждения.

Представим себе паз (рис. 2) и граничащие с ним части воздушного зазора в виде контура $ACEFHGDBA$, причем $DBAC$ соответствует пазу. Допустим, что оба зубца, примыкающие к пазу, имеют одинаковое насыщение, тогда распределение индукции будет симметричным и в принципе совпадать с показанным на рис. 1. Можно принять с достаточной точностью, что потенциал U_{m2} вдоль контура FH , представляющего поверхность полюсного наконечника, остается неизменным. Можно также принять, что потенциал U_{m1} вдоль контура EC и соответственно DG будет другой, например, более низкий, чем на FH , но сохраняющий одно и то же значение. Наконец, допустим, что на AB вследствие насыщения в зубце будет еще более низкий потенциал, но опять-таки постоянный вдоль этой линии. Простоты ради мы можем приравнять его нулю. Сделаем еще одно допущение, близкое к действительности и вносящее большую ясность в задачу: допустим, что напряженность поля H вдоль контуров AC и BD возрастает по параболе:

$$H = -\alpha - \beta \frac{h-z}{h} - \gamma \frac{(h-z)^2}{h^2}, \quad (1)$$

причем $h = \overline{AC} = \overline{BD}$ — высота паза; z — абсцисса, отсчитываемая от точки A , и α, β, γ — постоянные, относительно которых мы не вносим никаких ограничений. При этом, очевидно,

$$-\int_0^{\hbar} H dz = \hbar \left(\alpha + \frac{\beta}{2} + \frac{\gamma}{3} \right) \quad (2)$$

должно равняться U_{m1} . Наконец, принимаем, что вдоль контуров EF и GH потенциал от U_{m1} до U_{m2} возрастает прямолинейно.

Задачу можно решить в два этапа, если рассматривать независимо друг от друга фактор насыщения зубца и поток в воздушном зазоре. Можно сначала представить, что потенциал контура $ECABDG$ имеет заданное распределение, но по контуру $EFHG$ он имеет ту же величину U_{m1} , как и вдоль EC и GD . Затем полагаем вдоль контура $ECABDG$ потенциал равным нулю, а вдоль FH равным $U_{m2} - U_{m1}$.

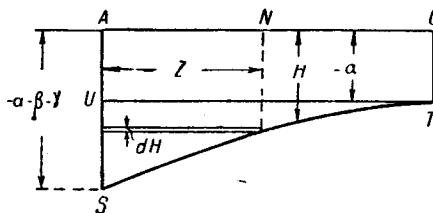


Рис. 3

причем вдоль EF и GH потенциал падает прямолинейно до нуля. Последнее соответствует, очевидно, случаю продольного пазового потока при ненасыщенном зубце, в то время как первый случай учитывает только влияние насыщения зубца. Если для каждого из этих случаев рассчитать распределение потока в пазу и затем наложить полученные результаты, получим пазовый поток для действительных заданных условий.

Рассмотрим первый случай. Если потенциал в AB равен нулю, а вдоль контура $CEFHGDU_{m1}$, то, очевидно, перпендикулярно к сторонам этого контура будут проходить силовые линии. Из-за экранирующего влияния стенок CE , KF , DG и LH из прямоугольников $CEFK$ и $DGHL$ в паз проникает относительно небольшое число силовых линий; сравнительно большое же количество их проникает из контура KL ,

так как напряженность поля обычно увеличивается по направлению к основанию паза. Из боковых стенок его выходит довольно заметный поток, и поэтому поток контура $CEFHGD$ сам представляет собой только часть общего потока. Следовательно, можно пренебречь падением магнитного напряжения потока, проникающего из прямоугольника $CEFK$ и $DGHL$ в паз, что равносильно тому, что потенциал вдоль контура CK и DL тоже будет постоянным и равным U_m .

Нашу задачу можно снова разделить на несколько частичных. Если H — напряженность поля в каком-либо определенном месте контуров AC и BD в направлении оси ST (рис. 3) — парабола

$$H = -\alpha - \beta \frac{(h-z)}{h} - \gamma \frac{(h-z)^2}{h^2},$$

то мы можем последнюю разбить на прямоугольные элементы высотой dH и длиной z , считая от AS . Допустим вначале, что мы имеем только один подобный прямоугольник. Другими словами, примем, что вдоль части контура AC между A и точкой N действует напряженность поля постоянной величины dH , а между N и C она равна нулю так же, как между C и K . Таким же образом мы имеем напряженность поля величиной dH между точками B и P при равенстве нулю ее между P и D и соответственно D и L . Если произвести расчет распределения поля при этих условиях и полученные результаты для всех прямоугольников $z dH$ сложить, то наша задача в отношении расчета влияния насыщения зубца будет решена.

Исследуем соотношения внутри прямоугольника $ANPB$. Мы имеем следующие граничные условия: вдоль контура AB потенциал dU_m равен нулю; вдоль AN и BP он изменяется прямолинейно до $-z dH$, т. е. $-x dH$, если x — расстояние какой-либо точки до AB удовлетворяет формуле. Для потенциала dU'_m внутри прямоугольника $NKLP$ аналогично будут иметь место следующие граничные условия: для $W = \pm i$ должно быть $dU'_m = -z dH$ и для $x = h + \delta$, где δ — толщина воздушного зазора CK , $dU'_m = -z dH$.

Относительно распределения потенциалов dU_m или dU'_m вдоль контура NP мы знаем следующее.

Потенциал в точках N и P равен $-z dH$ и по отношению к оси симметрии QR он должен распределяться симметрично. Потенциалы dU_m и dU'_m во всех точках внутри контура $ABLK$ удовлетворяют известному уравнению Лапласа. Наконец, вдоль линии NP напряженность поля внутри контура $ANPB$ должна иметь то же значение, что и внутри контура $NKLP$.

Если мы положим

$$\frac{4b}{n^2\pi^2} \sin \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi W}{b} : \operatorname{sh} \frac{n\pi}{b} (h + \delta) = f_n(W), \quad (3)$$

то из этих граничных условий следует:

$$dU_m = \Sigma f_n(W) dH \sin \frac{n\pi x}{b} \operatorname{sh} \frac{n\pi}{b} (h + \delta - z) - x \cdot dH; \quad (4)$$

$$dU_m' = \sum f_n(W) dH \sin \frac{n\pi}{b} (h + \delta - x) \operatorname{sh} \frac{n\pi z}{b} - \bar{z} dH. \quad (5)$$

Таким образом мы определили влияние элементарного прямоугольника $z dH$ на точки внутри прямоугольников $ANPB$ и $NKLP$.

Перейдем теперь к определению влияния полной силы поля H согласно уравнению (1). Для этой цели выберем какую-либо точку внутри паза. Расстояние от AB будет x . Выберем отрезок z , вдоль которого сила поля равна dH , так что $z < x$, тогда потенциал в этой точке, как было показано, дается уравнением (5) для dU_m .

Примем, что x постоянно, а z переменно. Тогда влияние всех элементарных прямоугольников zdH в пределах от $z = 0$ до $z = x$ определяется интегрированием.

Таким образом мы получили для результирующего потенциала U' выражение:

$$U'_{m\,res} = \int^{z=0} dU'_m. \quad (6)$$

При этом необходимо выразить dH через z согласно выражению (1), и это выражение вставить в уравнение (5). В той же точке на расстоянии x от AB имеется еще второй результирующий потенциал, обусловленный влиянием тех величин $z dH$, у которых $z > x$. Для определения мы должны исходить из U_m и проинтегрировать эту величину в пределах от $z = h$ до $z = x$. Тогда аналогично вышесказанному получим

$$U_{mres} = \int_{z=h}^{z=x} dU_m. \quad (7)$$

Сумма потенциалов $U_{mres} + U'_{mres}$ определяет эффект пло-

щади параболы STU . Кроме этой площади, нужно еще учесть влияние прямоугольника $AUTC$ длиной h и высотой $TC = \alpha$.

Для этого достаточно в уравнении (4) заменить dH величиной $-\alpha$ и z величиной h . Этот третий потенциал обозначим U_{ma} . Следовательно, результирующий потенциал

$$U_{ms} = U_{mres} + U'_{mres} + U_{ma}, \quad (8)$$

и принципиально часть нашей задачи решена. Нами определено влияние насыщения зубцов при параболическом распределении напряжения поля в зубцах. Исследуем теперь влияние поля, возникающего в пазах, при ненасыщенных зубцах, благодаря лишь потоку зазора.

Уравнение (6) дало потенциал U_{mres} в точке x , обусловленный насыщением для интервала $0 < z < x$. Если проинтегрировать уравнение (5) в пределах h и 0 , то получим, очевидно, влияние площади STU на точку, в которой $0 < x < (h + \delta)$. Обозначим этот частичный потенциал через $(U_{mres})_x > h$ и допустим, что он подсчитан. Влияние прямоугольника $ACTU$, потенциал U'_{ma} находится аналогично прежнему, если вставить в уравнение (5) вместо z величину h , а dH заменить через $-\alpha$. Вообразим, что и он также подсчитан. Тогда потенциал в некоторой точке внутри прямоугольника $CKLD$ (рис. 2), зависящий от насыщения

$$(U_{ms})_x > h = (U_{mres})_x > h + U'_{ma}. \quad (9)$$

Потенциал внутри этого прямоугольника, однако, не представляет для нас большого интереса, так как здесь не возникает никаких вихревых токов. Но можно эту формулу использовать для подсчета того потока, которым мы до сих пор пренебрегали и который мы теперь примем во внимание, а именно: потока, проникающего в паз из воздушного зазора под влиянием разности потенциалов $U_{m2} - U_{m1}$ между F и E . Относительные изменения напряженности поля вдоль линий CK и DL можно сейчас утверждать следующее: вдоль EF и GH она постоянна по условию. Если бы не было пазов, она была бы постоянной во всем воздушном зазоре. Но благодаря пазам на углах C и D поле сгущается. Очевидно, что эта концентрация уже вследствие насыщения в зубце в этих местах не может быть очень большой. Все же учтем ее. Мы сделаем, повидимому, весьма небольшую ошибку, если допустим, что радиальная составляющая поля, направленная по оси x вдоль контура CK и DL , следовательно, внутри границ $x = h$ и $x = h + \delta$, изменяется по какой-то линейной функции, для параметров которой мы пока не поставим никаких ограничений. Примем, что напряженность поля вдоль этих контуров изменяется согласно функции

$$\alpha'' - \beta'' \frac{h + \delta - x}{\delta}.$$

Тогда может быть применена с некоторыми изменениями формула для $(U_{ms})_x > h$:

Представим себе (рис. 4) (AC и BD , рис. 2) высоту зубца, уменьшенной до δ , и длины CK и DL , увеличенными до h . Далее положим напряженность поля вдоль AC и BD распределенной не по параболе ST (рис. 3), а по некоторой прямой VT , где

$$H = -\alpha - \beta \frac{\delta - z}{\delta}. \quad (10)$$

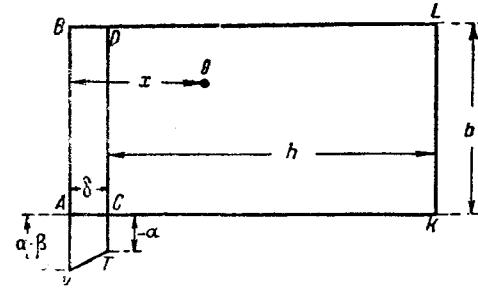


Рис. 4

В величине этих потенциалов ничего не изменится, если контур $ACKLDB$ повернуть на 180° таким образом (рис. 5), что точки $ACKLDB$ рис. 4 совпадут с точками $LDBACK$ рис. 5. При этом напряженность поля распределится согласно прямой $T'V'$. Однако в действительности поле по нашему предположению изменяется вдоль CK и DL по некоторой прямой $T''V''$ (рис. 5).

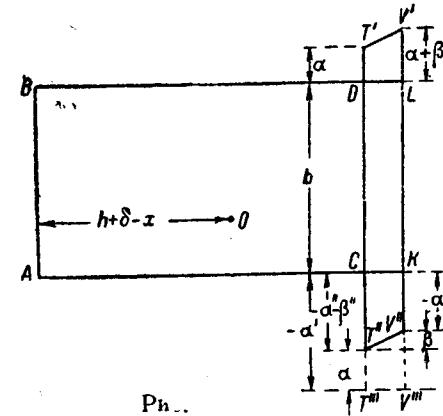


Рис. 5

Трапецию $CKV'T''$ можно рассматривать как разность прямоугольника $CKV''T''$ и трапеции $T''V''V'T'$, имеющей то же самое положение и величину, что и $DLV'T'$.

Если теперь заменить $-\beta$ некоторым числом $-\beta''$, а $+\alpha$ числом $-\alpha'' - \beta''$, то с нашим предположением о распределении потока в воздушном зазоре вдоль контуров CK и DL мы получим, очевидно, потенциал U_{ms} в точке O паза, возникающий под влиянием одного лишь потока в зазоре. Резюмируя вышесказанное, нам необходимо произвести следующие счетные операции: вставить выражение для dH из (1) в уравнение (5) и проинтегрировать последнее в пределах от $z = 0$ до $z = h$. Этот интеграл сложить с некоторым выражением, которое получится, если в уравнение (5) вместо z подставить h , а вместо dH вставить величину $-\alpha$. Сумма даст уравнение (9). В это уравнение вставляем $\gamma = 0$ и меняем местами h и δ . Пишем затем вместо x выражение $h + \delta - x$, вместо α выражение $\alpha'' - \beta''$ и вместо β выражение β'' и прибавляем C .

В полученной таким образом формуле проделаем теперь еще два существенных упрощения. Вставим в $\sin \frac{n\pi x}{b}$ вместо x выражение $h + \delta - (h + \delta - x)$. Если учесть теперь, что $\frac{n\pi}{b} (h + \delta)$ даже при $h = 1$, вообще говоря, велико, то получаем:

$$\sin \frac{n\pi x}{b} : \sin \frac{n\pi}{b} (h + \delta) \approx e^{-\frac{n\pi}{b} (h + \delta - x)} \quad (11)$$

Второе упрощение получается, если мы пренебрежем возможным увеличением напряженности поля вдоль толщины зазора, причем мы, как показал расчет, не сделаем практически большой ошибки.

Следовательно, можно написать:

$$U_{ms} = \sum \frac{4b}{n^2 \pi^2} \left(\alpha'' + \frac{\beta''}{2} \right) \sin \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi W}{b} \sin \frac{n\pi \delta}{b} e^{-\frac{n\pi}{b} (h + \delta - x)} - \alpha'' \delta - \frac{\beta''}{2} \delta + C. \quad (12)$$

Можно без большой погрешности в уравнениях (6) — (8) также положить $\delta = 0$. Эти уравнения, как и (12), в дальнейшем еще больше упростятся после исследования роли высших гармонических.

Напряженность поля, нормальную к стенкам зубца и зависящую от потенциала $U_{m\delta}$, обозначим через $H_{W\delta}$, тогда:

$$H_{W\delta} = -\frac{d U_{m\delta}}{d W}. \quad (13)$$

Предположим, что проводники в пазу изолированы друг от друга и расположены рядами по m проводников; при этом, простоты ради, допустим, что общая ширина всех m проводников равна ширине паза b . Исследуем соотношения внутри одного ряда, и так как здесь дело идет только о качественной оценке роли отдельных гармонических, пока для упрощения пренебрежем влиянием вихревых токов.

Каждый проводник пронизывается потоком, индукция которого в направлении W в каком-либо месте пропорциональна $H_{W\delta}$. Предположим, что $H_{W\delta}$ равномерно изменяется в течение определенного короткого промежутка времени от 0 до $H_{W\delta}$. Тогда разность плотностей тока вдоль краев прямоугольника, имеющего ширину dx и 1 см длины и расположенного нормально к оси W , будет дана уравнением:

$$d\rho \approx H_{W\delta} dx. \quad (14)$$

Потери p_{dx} по ширине всех проводников, если мы ради простоты предположим, что проводники заполняют всю ширину паза, будут:

$$p_{dx} \approx \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \rho^2 dx. \quad (15)$$

Подставляя уравнение (12) в (13), (14) и (15), можно убедиться, что при возведении в квадрат и интегрировании все произведения выражений, принадлежащих различным гармоникам, выпадают.

В выражение амплитуды (12) входит множитель $\frac{4b}{n^2 \pi^2}$.

В уравнениях (13) и (14) оно изменяется в $\frac{4}{n\pi}$ и принимает в уравнении (15) вследствие двойного интегрирования по меньшей мере форму $\frac{16b^2}{n^4 \pi^4}$. Так как в формулу (12),

кроме того, входит величина $\sin \frac{n\pi}{2}$, следовательно, за первой гармоникой идет третья, можно спокойно пренебречь всеми высшими гармоническими в уравнении (12), так как аналогичные соображения справедливы и для нормальной составляющей поля

$$H_{x\delta} = -\frac{d U_{m\delta}}{d x}. \quad (16)$$

Таким путем приходим к заключению, что в уравнениях (6) и (7) также можно пренебречь высшими гармониками.

Поэтому можно сделать еще и дальнейшее упрощение.

В уравнение (12) входит выражение $\cos \frac{\pi W}{b}$. Отсюда следует, что приблизительно $H_{x\delta}$ изменяется по синусоиде, а $H_{W\delta}$ — по синусоиде. При сложении возникающих из-за этих сил поля вихревых токов, очевидно, можно принимать, что они как будто бы распределены в направлении W в виде постоянных эффективных значений. Эти значения получатся, если в уравнениях (12), (13) и (16) заменить $\sin \frac{\pi W}{b}$ и

$\cos \frac{\pi W}{b}$ через $\frac{1}{\sqrt{2}}$.

Обозначая среднюю напряженность $\alpha'' + \frac{\beta''}{2}$ между полюсом и краем полюса, как и в прежних наших работах, через $\Phi_{\frac{\tau}{2}}$ и k_{δ} , получаем:

$$B_{W\delta} = \frac{4}{\pi \sqrt{2}} \frac{k_{\delta}}{\tau} \Phi_{\frac{\tau}{2}} \sin \frac{\pi \cdot \delta}{b} \cdot e^{-\frac{\pi}{b} (h + \delta - x)} = B_{x\delta}. \quad (17)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека

Уравнение (17), которое, естественно, не отражает физического распределения силовых линий, позволяет для каждой точки паза на высоте x непосредственно определить такую индукцию, которая в отношении вихревых токов эквивалентна действительной индукции.

Вернемся теперь к уравнению (8). Полагая $\delta = 0$ и $\pi = 1$, заменяя $f_n(W)$ его выражением из (3) и, наконец, произведя расчет аналогично уравнению (11) вместо уравнения (8), получим:

$$U_{ms} = -\sum \frac{4b^2}{\pi^3} \cos \frac{\pi W}{b} \left\{ \frac{\beta + 2\gamma}{h} \left[1 - e^{-\frac{\pi x}{b}} - e^{-\frac{\pi}{b}(h-x)} \right] - \frac{2\gamma}{h} \left[\frac{x}{h} - e^{-\frac{\pi}{b}(h-x)} \right] \right\} + (\alpha + \beta + \gamma) x - \frac{\beta + 2\gamma}{2h} x^2 + \frac{\gamma x^3}{3h^2}. \quad (18)$$

Чтобы исследовать теперь соответствующую этому потенциальному напряженность поля, дифференцируем уравнение (18) по x . При этом в первых прямоугольных скобках пропадет константа. Сравнивая после дифференцирования первую часть уравнения (18) со второй, третьей и четвертой, убеждаемся, что для $h > 2,5 b$ ее можно опустить. В результате получаем простую формулу:

$$H_{xs} = -(\alpha + \beta + \gamma) + (\beta + 2\gamma) \frac{x}{h} - \gamma \frac{x^2}{h^2}. \quad (19)$$

Это означает, что величина H_{xs} практически распределяется по той же функции от x , как и напряженность поля в обоих соседних зубцах.

Этот факт позволяет нам (так как действительное распределение не отличается значительно от параболического) допустить, что это будет иметь место также и при другом распределении; если H — напряженность поля на высоте паза, то можно написать:

$$H_{xs} = H. \quad (20)$$

Тот факт, что из наших сложных выражений мы получили простые формулы, отвечает и на вопрос, как мы должны рассчитывать в тех случаях, обычно имеющих место, когда насыщение в двух соседних зубцах неодинаково.

Очевидно, на основании аналогичного вывода относительно распределения потенциалов можно установить, что переход от одного потенциала к другому на одинаковой высоте будет происходить по синусоидальной функции по направлению W . Пренебрегая высшими гармониками, мы не сделаем большой ошибки, если предположим, что амплитуда основной волны не больше чем полуразность напряженностей поля в двух следующих друг за другом зубцах. Примем, что она имеет ту же величину, как и эта полуразность. Кроме того, можно при расчете потерь вместо выражения $\sin \frac{nW}{b}$ принять постоянную величину $\pm \frac{1}{\sqrt{2}}$.

При этом для каждой половинки паза эта напряженность поля вдоль W не меняется. Предположим, что в каком-либо зубце в какой-либо его точке напряженность поля H , а в следующем на той же высоте она $\lambda' H$, в следующем еще дальше зубце $\lambda'' H$. Следовательно, средняя напряженность поля в половине паза, примыкающего к первому зубцу, при перемещении на зубцовое деление уменьшается на

$$\Delta H = H - \lambda' H - \frac{\sqrt{2} - 1}{\sqrt{2}} \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{\lambda'}{2} \right) - \left(\frac{\lambda'}{2} - \frac{\lambda''}{2} \right) \right] H. \quad (21)$$

Величины H , $\lambda' H$, $\lambda'' H$ и т. д. на протяжении полюсного деления являются ординатами какой-то периодической кривой, которую можно разложить в ряд. n -я гармоника этого ряда имеет вид:

$$H_n = \sum A_n \sin \frac{n\pi t}{T_p}, \quad (22)$$

где A_n — некоторая постоянная;
 t — время;

T_p — то время, которое необходимо для перемещения на одно полюсное деление.

Очевидно, с достаточной точностью $H - \lambda' H$ так относится во времени $\frac{T_p}{z}$, как производная кривой в этой точке к единице (z — число зубцов на полюсное деление). Аналогично можно предположить, что $H(1 - \lambda') - H(1 + \lambda'')$ так относится к $\left(\frac{T_p}{z}\right)^2$, как вторая производная кривой в этой точке к единице.

Если провести расчет на этих основаниях, получим следующий результат. Потери в пределах одного зубового деления будут пропорциональны $(\Delta H)^2$, а общие потери P пропорциональны

$$P \approx \int_0^{T_p} (\Delta H)^2 dt =$$

$$= \sum \frac{n^2 \pi^2}{z^2} \frac{A_n^2 T_p}{2} \left(1 + \frac{2 - 2\sqrt{2}}{8} + 1 \cdot \frac{n^2 \pi^2}{z^2} \right) \quad (23)$$

Так как вообще $z > 12$ и даже в маленьких машинах > 8 , второй член выражения в скобках будет составлять для основной гармоники самое большое около 0,3%, для второй гармоники — 1,3%, а для третьей гармоники — 3% от первого члена.

Поэтому можно практически второй член опустить. Это означает, что уравнение (21) мы можем написать просто в виде:

$$\Delta H = H - H' \quad (21')$$

Или, другими словами, можно потери от продольного пазового потока, зависящего от насыщения зазора, подсчитать таким образом, как если бы величины радиальных составляющих поля были бы не только одинаковы во всех точках на одной и той же высоте, но и равны силе поля ближайшего зубца, ограничивающего паз.

Примем теперь, что, повидимому, весьма близка к действительности напряженность поля H в некотором определенном зубце пропорциональной средней напряженности поля $\frac{\Theta}{h}$ в этом зубце. Обозначим отношение H к $\frac{\Theta}{h}$ через ϵ .

Тогда радиальная слагающая возникающего от насыщения продольного потока в соседнем пазу

$$H_{xs} = \epsilon \frac{\Theta}{h} \quad (24)$$

Всобще говоря, мы получим весьма ясное представление о распределении H_{xs} , если будем знать ϵ для тех двух значений l_1 и l_2 , величины h которых соответствуют серединам верхнего и нижнего проводника (рис. 6).

Обозначим первое ϵ_1 и второе ϵ_2 .

Когда известны обе эти величины, то нам также известно и распределение величины H_{ws} , а следовательно, может быть с достаточной точностью определена и нормальная составляющая магнитного потока, выступающего из стенок зубца вследствие насыщения.

Дифференцируя прежде всего уравнение (18) по W , величину $\sin \frac{\pi W}{b}$ можно аналогично прежнему заменить через $\frac{1}{\sqrt{2}}$.

Далее ошибка будет очень мала, если заменить действительное распределение напряженностей поля в двух соседних зубцах линейным распределением, для которого нам известна напряженность поля на той высоте, где находится середина верхнего или соответственно нижнего проводника.

Это значит, что $\gamma = 0$, и величина $\frac{\beta}{h}$ может быть выражена через ϵ_1 и ϵ_2 , равно как и через l_1 и l_2 .

Таким путем мы получаем, если обозначим соответствующую индукцию через B_{ws} , уравнение:

$$B_{ws} = -\frac{1,6b}{\pi \sqrt{2}} \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{l_1 - l_2} \cdot \frac{\Theta}{h} \left[1 - e^{-\frac{\pi x}{b}} - e^{-\frac{\pi}{b}(h-x)} \right] \quad (25)$$

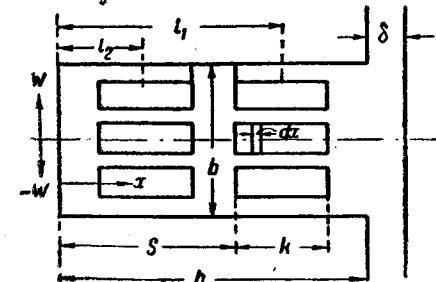


Рис. 6

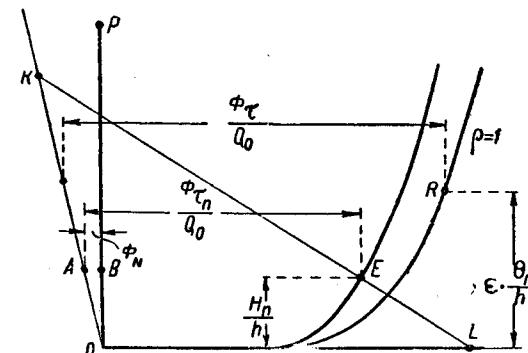


Рис. 7

Это уравнение дает магнитные соотношения только при равных насыщенных соседних зубцах. Но на основе рассуждения, аналогичного прежнему, можно при неравных их насыщенных действительный поток разделить на поток, соответствующий уравнению (25), и на какой-нибудь поперечный поток. Ввиду того что в прежней работе автора о поперечном пазовом потоке этот поток был исследован, мы можем, используя результаты этой работы, также при неравных насыщенных соседних зубцах подсчитать потери при помощи уравнения (25).

Аналогично предыдущему, приходим к результату, что величины B_{ws} можно определить из уравнения (17) также, если зубцы насыщены неодинаково. Величины B_{ws} при неодинаковых насыщенных зубцах мы можем разделить на величину, соответствующую уравнению (17), причем мы вместо Φ_t должны писать $(\Phi_{t_n} + \Phi_{t_{n-1}}) \frac{1}{2}$ и на величину B'_{ws} , которую получаем из уравнения:

$$B'_{ws} = \frac{4}{\pi \sqrt{2}} \frac{k_0}{\tau} (\Phi_{t_n} - \Phi_{t_{n-1}}) \frac{1}{2} \operatorname{sh} \frac{\pi \delta}{b} \cdot e^{-\frac{\pi}{b}(h+\delta-x)} \quad (26)$$

Таким образом, кроме поперечного потока, получающегося от тока якоря, и кроме поперечного потока, обусловленного насыщением зубцов, имеет место еще третий род поперечного потока, который получается в верхней части паза вследствие изменения потока в воздушном зазоре от одного зубового деления до другого.

Формулы (17), (24), (25) и (26) дают для пяти исследованных нами потоков соответствующую вихревым токам функцию, поскольку нам известны коэффициенты Φ_t , Θ , ϵ_1 и ϵ_2 . Φ_t и Θ легко определяются номографически, но и ϵ также просто определяется из номограмм.

В самом деле поток, проходящий через одно зубовое деление, нам известен, и поэтому можно (рис. 7) для отношения между шириной зазора и шириной паза отыскать некоторую прямую OK и ту точку R кривой $\rho = 1$, совпадающей с кривой намагничивания, горизонтальную Φ_t линию, на которой от OK равно заданному потоку $\frac{Q_0}{\Theta_n}$.

Ордината этой точки тогда должна быть равной $H_n = \epsilon \frac{\Theta_n}{h}$.

Таким образом мы располагаем всем необходимым для определения индукции любого пазового потока в любой точке паза, что позволяет произвести точный подсчет всех вихревых токов при любой нагрузке машины.

Новая формула для расчета электропривода с маховыми массами

Л. Б. Гейлер
Москва

В одной из предыдущих работ¹ мною была выведена формула для подсчета среднего квадратичного значения момента электродвигателя, снабженного маховыми массами, при работе его по графику ударной нагрузки, а именно (рис. 1):

$$M_e^2 = M_{eo}^2 - \frac{1}{AT} \sum_1^m (M_{ok} - M_{eo}) (M_k - M_o). \quad (1)$$

Здесь, как и в дальнейшем, сохраняются все обозначения, принятые в указанной статье. Формула (1) сама по себе вносила значительное упрощение в расчет электропривода с ударной нагрузкой и позволяла обходиться без неизбежного ранее графического способа — планиметрирования площади квадратичной кривой моментов.

Однако и при пользовании формулой (1) требуется вычисление ординат-моментов двигателя M_{ok} и M_{eo} , изменяющихся всякий раз, соответственно выбираемой величине электромеханической постоянной привода

$$T_n = \frac{1}{A} = \frac{n_0 GD^2 S_n}{375 M_n} \text{ sec.} \quad (2)$$

Между тем в практике проектирования электропривода с маховыми массами, связанной с проверкой ряда вариантов, существует потребность в определении величины M_e непосредственно как функции T_n или, что же самое, как функции произведения $GD^2 \times S_n$ без вспомогательных вычислений величин M_{ok} и M_{eo} для каждого удара или прохода по графику нагрузки.

В результате дальнейшего анализа работы электропривода по графику рис. 1 мне удалось получить такую формулу:

$$M_e = f(T_n),$$

которая представляет собой шаг вперед по сравнению с формулой (1) и дает законченное и вполне практическое решение для проектирования электропривода с ударной нагрузкой. Вывод этой формулы и является предметом настоящей статьи.

Если мы обратимся к графическому представлению функции $M_e = f_1(S \times GD^2) = f(T_n)$, то увидим, что во всех случаях она имеет характер кривой 1 рис. 2, т. е. весьма приближается к экспоненциальному закону зависимости от аргумента T_n .

Предельными значениями ординат M_e этой кривой будут:

$$M_{eo} \text{ при } T_n = 0$$

$$M_{mo} \text{ при } T_n = \infty,$$

где M_{eo} и M_{mo} представляют собой, соответственно, среднее квадратичное и среднее арифметическое значения моментов по заданному графику моментов, т. е. известные величины.

При таких условиях общее выражение для M_e может быть

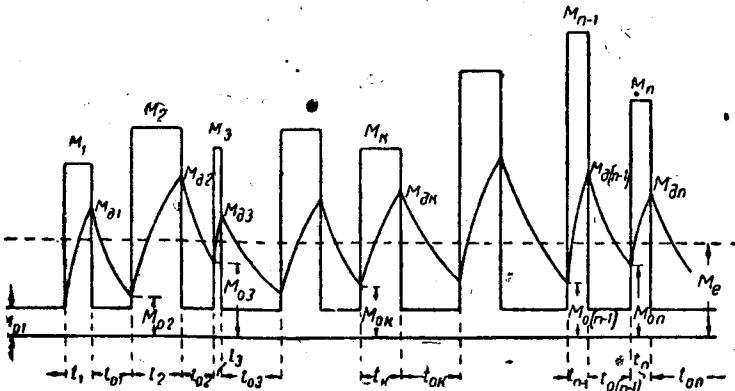


Рис. 1

¹ „Электричество“ № 20, 1935, Л. Б. Гейлер, К теории работы электропривода с маховыми массами.

написано в форме

$$M_e = M_{mo} - (M_{mo} - M_{eo}) e^{-cT_n} = M_{mo} + (M_{eo} - M_{mo}) e^{-cT_n}, \quad (3)$$

где c — некоторый коэффициент, зависящий только от вида заданного графика. Следовательно, задача сводится к отысканию коэффициента c .

Строго говоря, истинная кривая $M_e = f(T_n)$ представляет собой сочетание (сумму) целого ряда экспоненциальных функций с различными показателями, как это видно из выражения (1) в его развернутом виде. Поэтому экспоненциальная функция по равенству (3) должна рассматриваться только, как заменяющая или приближенно эквивалентная экспоненциальная функция. Точность ее вполне достаточна для практических целей, как это будет показано ниже на примерах.

В опубликованной ранее статье² было показано, что при очень малых значениях T_n , стремящихся к нулю, т. е. в начальном участке кривой $M_e = f(T_n)$, последняя может быть приближенно представлена уравнением [см. формулу (3) в названной статье]:

$$M_e^2 = M_{eo}^2 - \frac{1}{AT} \sum_1^m (M_k - M_o)^2 = M_{eo}^2 - \frac{T_n}{T} \sum_1^m (M_k - M_o)^2. \quad (4)$$

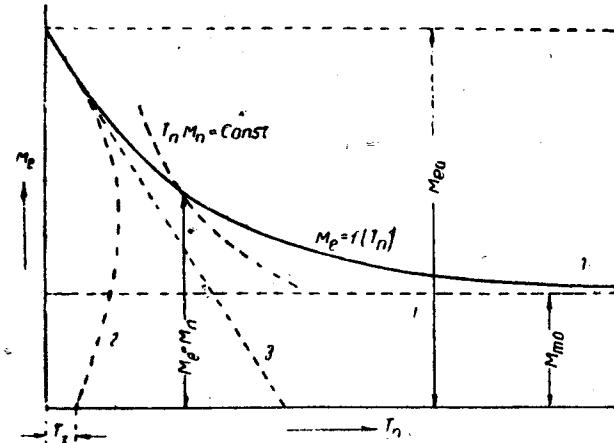


Рис. 2

Этому уравнению (4) соответствует кривая 2 рис. 2, которая с увеличением T_n начинает резко уклоняться от действительного протекания кривой $M_e = f(T_n)$. Кривая 2 имеет выпуклость и пересекает горизонтальную ось в точке, определяемой абсциссой:

$$T_x = \frac{\sum_1^m (M_k - M_o)^2}{M_{eo}^2} T_n. \quad (4')$$

Из рис. 2 мы можем усмотреть, что обе кривые $M_e = f(T_n)$ — действительная 1 и приближенная 2 — имеют в начальной части общую касательную 3, проходящую через точку с координатами $T_n = 0$ и $M_e = M_{eo}$. На основании равенства (3) уравнение касательной в любой точке кривой

$$\frac{d M_e}{d T_n} = -c (M_{eo} - M_{mo}) e^{-cT_n}, \quad (5)$$

² См. сноска 1.

точке $T_n = 0$:

$$\left| \frac{dM_e}{dT_n} \right|_{T_n=0} = -c(M_{eo} - M_{mo}). \quad (5')$$

с другой стороны, мы можем найти уравнение этой касательной, если продифференцируем равенства (4):

$$\frac{dM_e}{dT_n} = -\frac{1}{2T} \cdot \frac{\Sigma (M_k - M_o)^2}{M_e}. \quad (6)$$

В точке $T = 0$ $M_e = M_{eo}$, а потому производная получает значение:

$$\left| \frac{dM_e}{dT_n} \right|_{T_n=0} = -\frac{1}{2T} \cdot \frac{\Sigma (M_k - M_o)^2}{M_{eo}}. \quad (6')$$

Приравнивая между собой правые части равенств (5') и (6'), находим искомое значение:

$$c = \frac{1}{2T} \cdot \frac{\Sigma (M_k - M_o)^2}{M_{eo}(M_{eo} - M_{mo})}. \quad (7)$$

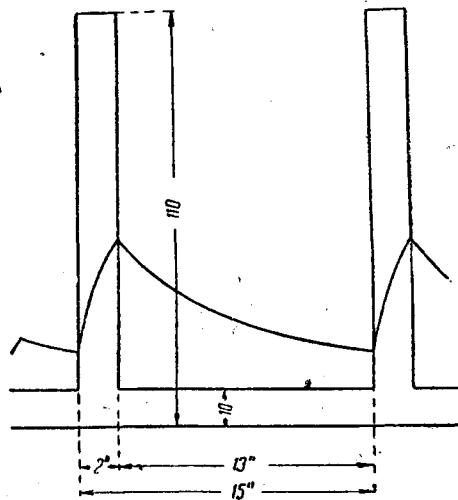


Рис. 3

Очевидно, что приближенная кривая, по уравнению (3), проходящая через общую начальную точку с действительной кривой и имеющая с ней общую касательную и одно и то же асимптотическое значение M_{mo} , будет самым близким образом совпадать с действительной кривой.

Изложенный выше вывод отнюдь не требует, чтобы работа двигателя в начале цикла обязательно начиналась с момента, равного моменту холостого хода привода, т. е. с M_o . При небольшой (по сравнению с T_n) продолжительности паузы между двумя смежными циклами работы уже не будет происходить полной зарядки маховых масс и полного восстановления скорости. Это значит, что в общем случае может быть $M_{o1} \neq M_o$ и $M_{o(n+1)} \neq M_o$; но всегда при установившемся режиме работы должно быть $M_{o(n+1)} = M_{o1}$. Формула (3) и относящаяся к ней формула (7) остаются верными, независимо от того, имеет ли место равенство $M_{o1} = M_o$ или нет.

Наличие функции $M_e = f(T_n)$ позволяет легко решать вопрос о выборе параметров привода, дающих наилучшее использование двигателя в тепловом отношении, иначе говоря определить условия, при которых номинальный момент M_n двигателя будет как раз равняться эффективному моменту M_e при работе по заданному графику. Например, если задан номинальный момент M_n , то, принимая $M_e = M_n$, находим по кривой $M_e = f(T_n)$ соответствующее значение T_n , которое уже позволяет найти искомую величину $S_1 = S_n \cdot GD^2$ в основании очевидного равенства:

$$S_1 = S_n \cdot GD^2 = T_n \frac{375 M_n}{n_o}.$$

Если по какой-либо причине предписана определенная величина $S_1 = S_n \cdot GD^2$, то на основании гиперболической за-

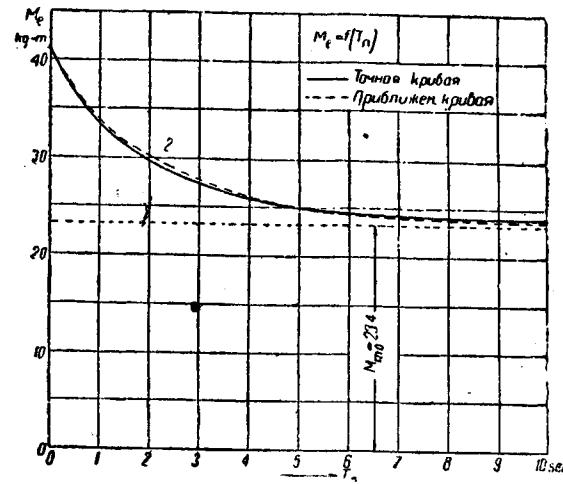


Рис. 4

висимости

$$T_n M_n = \frac{n_o G D \cdot S_n}{375} = \text{const}$$

строим на графике с кривой $M_e = f(T_n)$ (рис. 2) отрезок гиперболы $T_n M_n = \text{const}$. В точке пересечения обеих кривых получаем интересующее нас значение $M_e = M_n$.

Остается еще лишь указать, что формула (3) с коэффициентом c по формуле (7) не только позволяет ускоренным путем решать конкретные примеры на практике, но и дает возможность делать дальнейшие выводы общего характера из области проектирования электропривода с маховыми массами (вопросы минимума потерь в меди двигателя, устойчивости двигателя и пр.).

В заключение приведем 2 числовых примера.

Пример 1. Элементарный график ударной нагрузки (рис. 3):

$$M_0 = 10 \text{ kgm}; \quad t_1 = 2 \text{ sec.}$$

$$M_k = 110 \text{ kgm}; \quad t_{01} = 13 \text{ sec.}$$

$$T = 2 + 13 = 15 \text{ sec.}$$

$$M_{mo} = \frac{110 \cdot 2 + 10 \cdot 13}{15} = 23,4 \text{ kgm.}$$

$$M_{eo} = \sqrt{\frac{110^2 \cdot 2 + 10^2 \cdot 13}{15}} = 41,2 \text{ kgm.}$$

$$\frac{M_{eo}}{M_{mo}} = 1,76.$$

По формуле (7):

$$c = \frac{1}{2 \cdot 15} \cdot \frac{(110 - 10)^2}{41,2(41,2 - 23,4)} = 0,455.$$

Следовательно, по формуле (3):

$$M_e = 23,4 + 17,8 e^{-0,455 T_n}.$$

На рис. 4 дана кривая 2, построенная по этой формуле (приближенная), и кривая 1, построенная по точным формулам:

$$M_{ok} = M_{o1} = M_k - (M_k - M_o) \frac{1 - e^{-At_{ok}}}{1 - e^{-AT}} \cdot e^{-At_k}$$

$$M_{o1} = M_{o1} = M_k - (M_k - M_o) \frac{1 - e^{-At_{ok}}}{1 - e^{-AT}}$$

$$M_e^2 = M_{eo}^2 - \frac{(M_k - M_o)^2}{AT} \cdot \frac{(1 - e^{-At_k})(1 - e^{-At_{ok}})}{1 - e^{-AT}}.$$

Как видим, совпадение обеих кривых получается весьма близким.

Пример 2. В качестве второго примера возьмем более сложный график работы листового стана — трио 520 ттм, состоящий из 7 проходов (рис. 5) и уже рассмотренный нами в предыдущей работе, где указаны все данные его. В этом

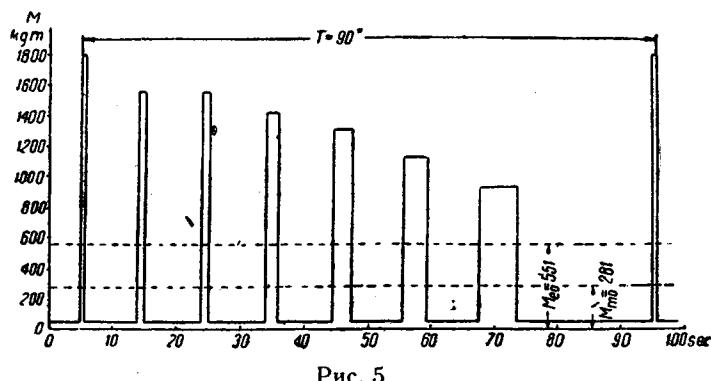


Рис. 5

случае

$$M_{mo} = 281 \text{ kgm} \cdot M_{eo} = 551 \text{ kgm}$$

$$c = \frac{1}{2 \cdot 90} \cdot \frac{13075000}{551(551 - 281)} = 0,488,$$

следовательно по формуле (3)

$$M_e = 281 + 270 \cdot e^{-0,488 T_n}$$

$S_1 = S_n G D^2$	T_n sec	M_e (точное значение) kgm	M_e (при- ближенное значение) kgm	Ошиб- ка
	0	551	551	0
	50	523	527	+0,71
	100	496	503	+1,21
	200	450	456	+1,33
	300	415	414	-0,24
	400	385	379	-1,56
	500	360	351	-2,9
	600	340	329	-3,2

В таблице приведены точные значения M_e и приближенные, вычисленные для разных значений T_n по последней формуле. Из таблицы видно, что совпадение приближенных и точных значений M_e получается весьма хорошее и более чем достаточное для практических целей.

О величине $\operatorname{tg} \delta$ низковольтных электроизоляционных материалов

ОБЫЧНО при рассмотрении свойств электроизоляционных материалов принимают, что величина тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ даже у низкокачественных низковольтных материалов сравнительно невелика и составляет всего малые доли единицы. Этому способствует и то, что у низковольтных материалов величина $\operatorname{tg} \delta$ обычно не измеряется, так как она лежит за верхним, пределом чувствительности ходовых мостов Шеринга; из всех электроизоляционных характеристик низковольтных материалов чаще всего измеряются лишь удельное объемное сопротивление $\rho_v \Omega_{\text{см}}$ и диэлектрическая проницаемость ϵ . Мы покажем, что, используя значения ρ_v и ϵ , измеренные при определенной частоте f Hz, легко найти нижний предел величины $\operatorname{tg} \delta$ данного материала при той же частоте.

Потери мощности в единице объема материала при постоянном поле напряженности E V/cm составляют:

$$P_{\perp} = \frac{E^2}{\rho_v} W/cm^3. \quad (1)$$

То же в случае переменного поля эффективной напряженности E V/cm:

$$P_{\perp} = \frac{E^2 f \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{12}} W/cm^3. \quad (2)$$

При обычном в твердых диэлектриках ионном характере проводимости должно иметь место неравенство:

$$P_{\perp} \geq P_{\perp}. \quad (3)$$

Уравнения (1) и (2) дают в соответствии с (3)

$$\rho_v \epsilon f \operatorname{tg} \delta \geq 1,8 \cdot 10^{12}$$

или

$$\operatorname{tg} \delta \geq \frac{1,8 \cdot 10^{12}}{\rho_v \epsilon f}. \quad (4)$$

Полагая $f = 50$ Hz, будем иметь:

$$\operatorname{tg} \delta \geq \frac{3,6 \cdot 10^{10}}{\rho_v \epsilon}. \quad (5)$$

Формула (5) весьма удобна для наглядных приближенных подсчетов. Легко показать, что величина $\operatorname{tg} \delta$ низковольтных электроизоляционных материалов в действительности должна быть весьма значительна.

Например, для шифера с $\rho_v = 10^2 \Omega \text{ см}$ и $\epsilon = 7,2$, мы будем иметь

$$\operatorname{tg} \delta \geq 500.$$

Б. М. Тареев

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОНФЕРЕНЦИИ

Международная конференция по крупным электросистемам высокого напряжения

И. С. Стекольников

Энергетический институт им. Кржижановского
Академии наук СССР

Из большого числа докладов, представленных на обсуждение конференции по электросистемам, собравшейся на переднюю, 9-ю сессию в Париже (24 июня — 3 июля 1937 г.), в настоящем обзоре реферируются почти все доклады, объединенные тремя секциями:

- 1) молния и разрядники;
- 2) перенапряжения;
- 3) измерения и измерительная аппаратура.

С целью более четкого разделения тематики докладов они разбиты в обзоре на группы вне связи с рассмотрением их в той или иной секции конференции.

Первая группа докладов. Исследованиям молний в полевых условиях и изучению отдельных вопросов, связанных с этой проблемой, в лабораторных условиях посвящено 8 докладов.

В двух сообщениях (H. Gränewald и W. Lewis) приводятся результаты 4-летних (с 1933 по 1936 г.) измерений амплитудных значений токов молний с помощью ферромагнитных регистраторов.

Установленные в большом количестве на различных элементах конструкций высоковольтных линий передач (ноги мачт, траверзы, тросы, противовесы и пр.) регистраторы или обширный материал, на основании которого авторы делают ряд выводов относительно параметров линий, необходимых для увеличения грозоупорности. В целях более удобного сопоставления результатов измерений, проведенных в германских и американских электросистемах, на рис. 1 из упомянутых докладов приведены графики, показывающие распределение токов молний в отдельных мачтах. На рис. 2 даны графики токов в канале молний. Значения токов авторы докладов получили, суммируя токи в отдельных мачтах, и потому эти графики лишь показывают возможные величины полных токов молний.

Как видно из сопоставления приведенных материалов, картины распределения токов и полярностей разрядов по измерениям, сделанным в Германии и Америке, в общем близки друг другу.

Весьма интересны хотя недостаточно полны результаты измерений токов в радиальных и протяженных противовесах.

Судя по этим измерениям, в среднем ток, текущий по противовесу, пропорционален его длине, причем для длинных проводов наблюдается некоторая тенденция к увеличению текущих по ним токов больше, чем это со-

ответствует их длине. Дальнейшие измерения должны уточнить ряд наметившихся предложений относительно зависимости распределения токов вдоль противовесов.

Введение метода магнитозаписи показало, что далеко не все прямые удары молний в линии передач вызывают перекрытия изоляции.

В докладе Gränewald приводятся данные, из которых явствует, что число перекрытий, вызываемых поражениями молнией линий с рабочим напряжением выше 60 кВ, защищенных тросом, составляет лишь около 15% от общего числа прямых ударов. На линиях меньшего рабочего напряжения отношение числа перекрытий к общему числу поражений молнией несколько больше (23%).

Так как метод магнитозаписи дает лишь амплитудные значения токов молний, неопределенным остается весьма важный параметр волны тока — крутизна фронта. Отсутствие сведений по этому вопросу в некоторых случаях не позволяет производить анализа аварий. В рассматриваемом докладе приводится целый ряд случаев, при которых имело место перекрытие изоляции на опорах, в то время как величина потенциала опоры по отношению к проводам (определенная как произведение максимального значения протекающего через опору тока на сопротивление растеканию ее заземления) значительно меньше, чем импульсная прочность этой изоляции.

Доклад Gränewald заканчивается призывом к исследователям других стран развернуть широкую работу по внедрению магнитозаписи и ряда других методов, которые позволили бы накопить материал, способствующий надеж-

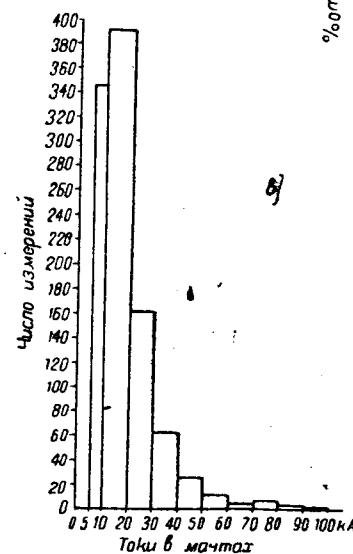
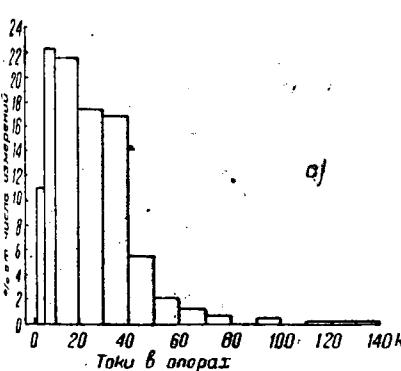


Рис. 1. Амплитудные значения токов молний в мачтах линий передач
— по измерениям, произведенным в Америке; б — по измерениям, произведенным в Германии

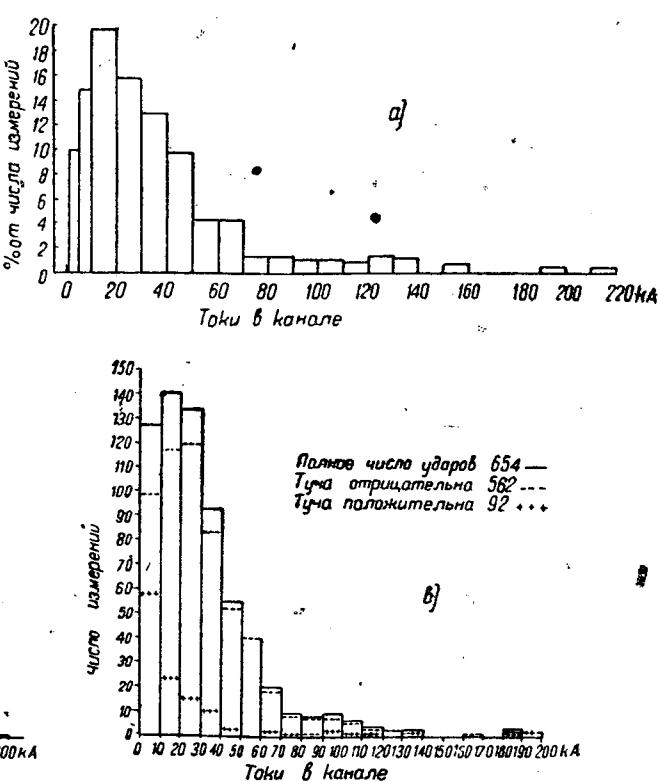


Рис. 2. Вероятные амплитудные значения токов молний по измерениям на линиях передач
— а — измерения в Америке; б — измерения в Германии

ному анализу аварий и, следовательно, выработке действенных мер защиты электросистем от прямых ударов молний.

Доклад И. Стекольникова и Х. Валеева (СССР) посвящен описанию измерений различных параметров молний в полевой лаборатории, расположенной под Москвой. После изложения принципов работы оригинальной схемы для улавливания молний и специальной аппаратуры, установленной в помещениях лаборатории, приводятся результаты, полученные в грозовой сезон 1936 г. Наиболее важные результаты описываемых работ были опубликованы в журнале „Электричество“ № 2, 1937 г.

Работу, посвященную измерениям индуцированных напряжений, возникающих на линиях электропередач при грозовых разрядах, представил Н. Нориндер. Целью предпринятых в 1936 г. исследований было: непосредственными измерениями определить величины возникающих при индукции напряжений и выяснить опасность этих импульсов для изоляции высоковольтных систем.

Аналитический метод расчета индуцированных напряжений требует знания начальных условий распределения зарядов и механизма протекания разряда, т. е. сведений, которые обычно не могут быть получены. Для экспериментального получения необходимых результатов может служить катодный осциллограф, подключенный к линии. Для измерений Нориндер использовал высоковольтную экспериментальную линию, имеющую один провод, подвешенный на деревянных опорах с деревянными траверсами. Разрядное напряжение изоляции линии (без дерева) — 1150 кВ. Длина линии — 15,5 км. Участок линии длиной 2 км от одного конца линии в нижеследующих опытах был отсоединен. Один конец линии был соединен с землей¹, другой конец, на котором производились измерения импульсов, был изолирован. Деление напряжения производилось при помощи емкостного потенциометра. Во время гроз одна подвижная станция, оборудованная катодными осциллографами, регистрировала напряжения, возникающие на линии, а другая — изменения магнитного поля, происходящие в результате изменений тока молний.

По осциллограммам колебаний напряженности магнитного поля автор определял изменения тока в канале разряда (упомяну, что в нашей литературе уже отмечались ошибки, связанные с этим методом расчета). В результате своих измерений Нориндер получил одновременные записи изменений тока молний и напряжения на проводах линии. При этом дополнительно фиксировалась локализация ударов молний и определялись расстояния пораженных разрядом мест от линии.

Сравнение результатов подсчетов с данными осциллограмм приводит к заключению, что, зная расстояние канала молнии от линии, аллюр тока молний и константы линии, можно аналитически определить характер изменения индуцированного напряжения. Такой подсчет интересен с теоретической точки зрения, однако для практических целей единственным приемлемым способом является регистрация импульса осциллографом.

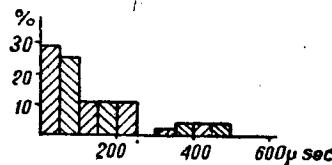


Рис. 3. Длительность апериодических волн напряжения

На рис. 3 представлены результаты измерений длительности импульсов напряжений, а на рис. 4 просуммированы характеристики фронтальных частей волн. Результаты измерений амплитудных значений² волн изображены на рис. 5. Автор отмечает получение относительно небольших значений максимальных напряжений против ожидаемых, согласно

¹ К сожалению, Нориндер не уточняет условий заземления конца линии, и это важное обстоятельство в его докладе остается неясным.

² Отметим, что из доклада неясно, даны ли в качестве амплитудных значений действительные значения или получаемые из осциллограмм в этих экспериментах удвоенные у холостого конца линий величины.

его представлениям о градиентах, волнах с напряжением в рядка 500 кВ. Из наблюденных разрядов два имели место в расстояниях 1,1 и 1,5 км.

Доклад С. Давиже представляет собой вторую часть сообщения, сделанного им в 1935 г. Автор полагает, что на основании всего имеющегося материала по изучению молний можно сформулировать 3 «фундаментальных закона»:

«1. Молния в основном состоит из транспорта ионов, действующего между грозовой тучей и землей с весьма большой скоростью по очень узкому пути.

2. Молнию представляет собой апериодический разряд между тучей и землей или между двумя тучами.

3. Молнию нужно уподобить разряду очень высокого напряжения».

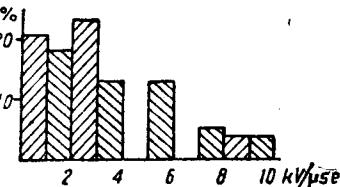


Рис. 4. Крутизна фронта волн

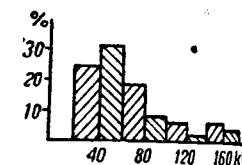


Рис. 5. Амплитудные значения индуцированных волн напряжения

В то время как третье положение не вызывает в силу своей очевидности и элементарности сомнений, первый и, в особенности второй «закон» уже ко времени их формулировки не являются достаточно общими. Большая часть доклада посвящена литературному обзору некоторых хорошо известных работ в области изучения молний. Наиболее интересна та часть доклада, которая рассматривает вопрос о влиянии различных факторов на избирательную поражаемость. Давиже снова повторяет свои старые утверждения, что электрическая проводимость воздуха в точке, куда уделяет молния, более высока, чем в окружающих местах и что в часто поражаемых местах проводимость, обусловленная отрицательными ионами, более высока, чем проводимость положительных ионов. Экспериментальные и теоретические работы Viel и Gibrat не подтвердили положений Давиже о связи между общей повышенной проводимостью воздуха и избирательной поражаемостью молний.

Давиже, павторяя ряд критических замечаний, высказанных автором этого обзора в литературе, полагает, что несоответствие между его опытами и экспериментами Viel объясняется различностью методик, применявшихся при проделанных измерениях. Рассматривая, как может отрицательная молния избирательно поражать места, над которыми воздух имеет повышенное содержание отрицательных ионов, Давиже теперь уже признает наличие противоречия (указанного мною еще в 1935 г.), которое по его мнению должны разрешить будущие исследователи.

Свой доклад он обещал закончить в 1939 г.

Доклад И. Стекольникова и А. Белякова (СССР) посвящен проблеме движения искрового разряда в воздухе. Как показал ряд проделанных в ВЭИ работ, основным фактором, определяющим траекторию разряда, является электродинамическое поле, развивающееся совместно с разрядом и зависящее от характера разряда (мощности, продолжительности и т. д.) и окружающей обстановки (проводимостей различного рода включений, объемных зарядов, проводимостей электрородов, их конфигурации и т. д.). Большое количество лабораторных экспериментов, оригинальных по методике, позволило отчетливо продемонстрировать избирательную поражаемость искровым разрядом поверхности земли в зависимости от положения статических и динамических рельефов уровней.

В докладе описываются эксперименты, проделанные с моделью, имеющей в качестве одного электрода реальную землю. Созданием различных проводящих слоев можно отклонить разряд в определенное место. Рис. 6 иллюстрирует действие хорошо проводящего шара, уложенного в землю.

Несмотря на наличие двух высоких холмов, искровой разряд заканчивается в «ущелье», на хорошо проводящем шаре. В основном в докладе развиваются идеи, которые руководят работами, проводимыми в ВЭИ в течение нескольких лет.

Все возрастающее значение, которое приобретают лабораторные опыты по испытаниям изоляции, заставляющие

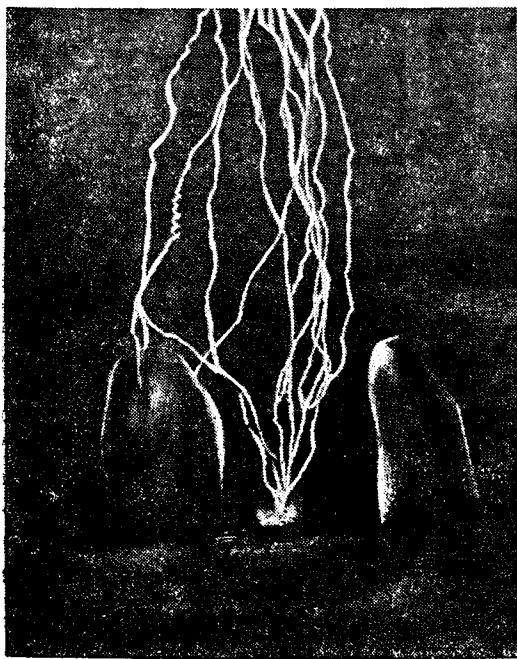


Рис. 6. Иллюстрация влияния хорошо проводящего шара, находящегося в 'ущелье', на избирательную поражаемость

ляет создавать установки, приближающиеся по своему действию к действительному удару молнии. До настоящего времени, однако, мощности существующих генераторов импульса еще слишком малы, чтобы от них можно было получать импульсы, напряжение и ток которых близки по величине таковым в грозовом разряде. В лаборатории Вестингауза построена комбинация ударных установок, которая позволяет получать в определенной быстрой последовательности волну напряжения до 3000 кВ и импульса тока с амплитудой до 150 кА. Эта установка и ряд произведенных на ней испытаний описаны в докладе Р. Bellaschi.

Принцип действия схемы (работа которой, вообще говоря, уже описывалась автором в различных журналах) поясняется рис. 7. Установка состоит из контура VG , дающего волну напряжения до 3000 кВ (контур имеет следующие параметры: общая емкость при разряде 8000 μF ; индуктивность 60 μH и сопротивление 80 Ω), контура CG , дающего волну тока (емкость контура 16 μF , зарядное напряжение 100 кВ) с амплитудой до 150 кА и временем спада до половины амплитудного значения равным 200 μsec , и так называемого микросекундного выключателя Z , служащего для координации времени разряда обоих контуров. При работе установки сначала происходит разряд генератора CG , напряжение которого вызывает перекрытие испытуемого объекта T . Через интервал времени, измеряемый микросекундами, происходит разряд генератора тока, посылающего свою энергию через испытуемый объект.

Конструкция синхронизирующего выключателя может быть различной. В описываемой установке для этой цели используется проволочное сопротивление, соединяющее испытуемый объект с генератором токов. Параметры проволоки — ее длина и величина сопротивления — должны быть подобраны таким образом, чтобы до начала разряда контура тока сопротивление было значительным по сравнению с импедансом генератора напряжения, а при начале действия контура тока путь в пространстве, занимавшийся проволокой, получил достаточно малое сопротивление (для пропуска больших величин токов). Величины сопротивлений ввиду сказанного различны при испытании объектов с различным разрядным напряжением. Применявшиеся в опытах проволоки имели длину от 50 до 300 см и сопротивление от 100 до 1000 Ω .

При помощи описанной установки производились испытания гирлянд изоляторов, стержневых искровых промежутков, деревянных опор, силовых и измерительных трансформаторов, различных разрядников и пр. Характер электродинамических и диэлектрических нагрузок, создаваемых описанной установкой, как отмечает автор, вполне отображают условия работы аппаратуры при прямых ударах молнии.

К рассмотренной группе докладов можно еще отнести работу А. Акопяна (СССР). Автор рассматривает влияние различных факторов на выбор модели для определения защитных зон стержневых молниевыводов: масштаб модели, форму напряжения источника, полярность импульсной волны, форму электрода, проводимость нижнего электрода и положение верхнего электрода, имитирующего облако, по отношению к испытуемому объекту.

Автор анализирует литературу, посвященную выбору зон защиты, и устанавливает, что при соблюдении определенных условий проведения опытов в результатах экспериментов не получается необъяснимых противоречий⁸.

На основании большого числа экспериментов для случаев защиты сооружений при помощи двух, трех и более стержневых молниевыводов установлены величины зоны защиты в зависимости от геометрических размеров модели.

Исходя из положения, что кривой, представляющей собой геометрическое место расстояний, по длине которых воздух имеет одинаковую прочность, служит эллипс, автор аналитически находит зависимости между коэффициентом защиты (отношение радиуса защищаемой зоны к высоте молниевывода) и геометрическими размерами модели. Проверка полученных зависимостей опытным путем на моделях приводит к хорошим результатам.

Вторая группа докладов. К этой группе отнесены доклады, в которых рассматриваются перенапряжения атмосферного происхождения или вызываемые искусственно при помощи ударных контуров.

Вопросу изучения распространения волн вдоль линий передач и воздействию импульсов на стационарную аппаратуру посвящены два доклада. В одном из них, представленном С. Фертиком и А. Потужным (СССР), импульсы от мощного контура с напряжением до 1800 кВ посыпались по проводам 35-кВ линии на деревянных опорах. На основании большого количества осциллограмм, полученных при движении волн с характеристиками $\pm 1/5$, $\pm 1,5/40 \mu\text{sec}$, и короткой срезанной волны авторы приходят к следующим выводам:

1. Положительные волны затухают быстрее отрицательных.

2. Затухание волн, амплитудное значение которых выше коронного напряжения линии, идет значительно быстрее, чем у импульсов с напряжением ниже коронной величины.

3. Формула, рекомендованная Менджером для определения снижения амплитуды волны после прохождения определенной длины линии, дает более или менее удовлетворительные результаты при волнах $1/5$ и $1,5/40 \mu\text{sec}$ и то при условии, что коэффициент, характеризующий затухание волны, изменяется при изменении ее амплитуды даже при неизменной форме и полярности импульса. Для срезанных волн формула дает неудовлетворительные результаты.

4. При движении вдоль линии волны, имеющей напряжение выше коронного, на ее фронте образуется ступень, возможность объяснения которой авторы видят в многоскоростной теории Бьюли.

Вторая часть доклада посвящена изложению опытов по изучению преломления волн в узлах подстанций. Как показала регистрация волны, набегающей на подстанцию, эффект действия ее может быть, по крайней мере в течение первых 8 μsec , получен замещением аппаратуры подстанции емкостью. При этом величина емкости определяется режимом работы этой подстанции.

С целью более детального изучения вопросов, связанных с координацией изоляции, была построена модель подстанции, которая имела натуральные размеры, но в которой в качестве трансформаторов были применены соответствующие величины емкости. Модель служила для изучения различных схем защиты.

Второй доклад представлен от Англии W. Hawley и H. Lasey. Объектом, на котором производились исследования, служила также 30-кВ линия длиной около 16 км. Генератор импульсов давал волны с характеристикой $\pm 1/7 \mu\text{sec}$, напряжением 110 и 210 кВ (ниже и выше коронного напряжения линии) и короткую срезанную волну (с положительным напряжением 315 и 340 кВ). Результаты измерений затухания

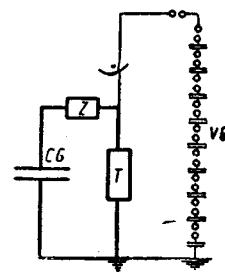


Рис. 7. Схема генератора молний

волны при движении их вдоль линии, полученные при помощи передвижного катодного осциллографа, вкратце сводятся к следующему.

Срезанные волны затухают значительно интенсивнее, чем волны $1/7$ мес. При напряжениях волны выше коронного напряжения линии положительные импульсы затухают быстрее отрицательных. Качественно совершенно аналогичные результаты получились и при измерении уменьшения крутизны фронта волны. Причину образования на фронте волны при движении ее вдоль линии площадки, авторы не склонны рассматривать с точки зрения многоскоростной теории Bewley (Бьюли). Авторы объясняют получающуюся деформацию волны изменением, под действием короны, емкости проводника, благодаря чему происходит замедление движения соответствующих элементов волны, что и влечет искажение формы фронта ⁴. Наблюдения показали, что изменение содержания влаги в атмосфере (в пределах от 4,4 до 9,4 г/м³) не влияет на затухание и форму волны. Некоторое влияние атмосферных условий обнаружено лишь в виде изменения формы волны, обусловленной, как отмечалось, короной.

Одновременно с исследованием движения волны по одному проводнику делались измерения волн, индуцированных на других проводниках двухцепной линии. При удалении волн от источника импульсов в индуцированной волне проявляется элемент обратной полярности. Появление его авторы не склонны объяснить многоскоростной теорией движения волн, но вместе с тем своего объяснения не выдвигают. Опыты показали, что коэффициент связи сохраняется постоянным и не зависит от формы волны. Влияние короны на индукцию волн на соседнем проводе незаметно.

Авторы занимались также исследованиями работы искровых промежутков, разрядников и абсорберов ⁵. Однако в этой части описание условий опытов неполно, и отсутствуют указания на конкретный тип испытывавшейся аппаратуры, что обесценивает сообщение.

Небольшой доклад M. Ryle служит как бы напоминанием того, что при анализе вопроса о величинах разрядных напряжений при обратных перекрытиях необходимо считаться с высотой опоры, имея в виду определенную крутизну волны.

Автор элементарными графоаналитическими построениями демонстрирует влияние формы фронта волны и высоты опоры на величину потенциала верхушки опоры относительно земли. В качестве примера Ryle приводит случай поражения опоры высотой 149 м молнией с амплитудным значением тока I , равным 30 кА. Изоляция линии имела минимальное импульсное напряжение перекрытия 1400 кВ (волна $+1,5/40$ мес). Несмотря на то, что сопротивление заземления опоры R было порядка 1 Ω , что дает потенциал опоры, определенный по методу произведения IR , равный всего лишь 30 кВ, изоляция линии была перекрыта. Роль крутизны волны, конечно, должна учитываться при анализе аналогичных случаев.

Весьма интересны сведения, сообщаемые в докладе „Грозоупорные линии передач“, представленном американцами E. Hansson и A. Bang.

Путем правильного расположения тросов, устройства противовесов и усиления изоляции линии было достигнуто резкое снижение аварийности от прямых ударов молний. Эффект увеличения грозоупорности иллюстрируется на примере трех различных линий с рабочим напряжением 69, 132 и 230 кВ. Табл. 1 служит доказательством успеха устройства защиты линий.

Любопытно отметить, что стоимость выполненных защитных мероприятий относительно невелика. Следующие цифры, выражющие затраты в процентах от стоимости линии, иллюстрируют сказанное: линия 230 кВ, противовесы 1,5%; линия 69 кВ изменение опор, подвеска двух тросов, улучшение изоляции и укладка двойных протяженных противовесов—всего 8,5%.

Авторы подчеркивают ничтожность затрат по сравнению с экономическим и техническим эффектом от создания практически грозоупорных линий. Необходимо обратить внимание на то, что при помощи в общем доступных средств может быть весьма значительно улучшена работа линий передач.

⁴ Это объяснение деформации волны хорошо известно в нашей литературе.

⁵ Под абсорбером имеется в виду устройство, состоящее в принципе из катушки самоиндукции и металлического цилиндра, в котором происходит поглощение части энергии импульса, проходящего через аппарат, включаемый в расечку провода защищаемой фазы.

Таблица 1

Напряжение линии kV	Длина линий km	Время наблюдений лет	Число выключений за рассматриваемое время	
			действительное	возможное при отсутствии противовесов*
230	147	5	1	80
132	32	2	0	17
69	23	1,25	0	20

* Примечание. Возможное число выключений определяется из подсчета числа ударов молний с амплитудным значением тока такой величины, что умножение его на сопротивление заземления опоры дает напряжение, достаточное для перекрытия линейной изоляции.

Об успешном результате проведения защитных мероприятий в ряде бельгийских (континентальных и колониальных) электро-систем различных рабочих напряжений сообщает Бельгийский комитет по изучению перенапряжений (доклад G. Gillon и R. De Lancker).

В своем обзоре авторы касаются линий с рабочим напряжением от 6 до 120 кВ, особенно подробно останавливаясь на 30-кВ линиях. Работы по защите 30-кВ линий начаты с 1931 г. По характеру проведенных в течение 6 лет (1931—1936 г.) мероприятий можно разделить это время на несколько периодов. В 1931 г. линии были оборудованы защитной аппаратурой в виде индуктивных катушек, включенных перед трансформаторами (с индуктивностью 0,06 мН), конденсаторами (емкостью по 0,015 мF) и искровыми промежутками, предназначенными для ограничения напряжений, возникающих при колебаниях. Многочисленные пертурбации в системе, имевшие место в 1932 г., побудили искать другие методы защиты. С целью создания точек с ослабленной изоляцией были введены искровые промежутки, установленные на гирляндах изоляторов. Эксплуатация 1933 г. показала малую эффективность выполненных мероприятий, и поэтому в 1934 г. были проведены следующие работы.

Изъяты конденсаторы и искровые промежутки, осуществлена подвеска дополнительных тросов, выполнены противовесы и установлены разрядники с сопротивлением, зависящим от напряжения. Эти мероприятия резко уменьшили аварийность 30-кВ системы.

Выводы, которые авторы доклада делают по рассмотрению материала по линиям всех напряжений, в основном сводятся к следующему.

1. Линии 110—120 кВ имеют большую надежность в эксплуатации. Очень хорошо работают линии с напряжениями 50 и 70 кВ. Некоторые трудности, имевшие место при развитии системы, были ликвидированы с помощью усиления изоляции и установки тиристорных и свинцовых разрядников.

2. Весьма хорошие результаты дало применение разрядников в 15-кВ системах.

3. Весьма хорошие результаты в 6- и 15-кВ системах показало применение катушек Петерсена. Их применение должно быть повсеместным.

Третья группа докладов. Измерениям, применяющимся в высоковольтной технике, посвящено 8 докладов, из которых 4 трактуют вопросы конструкции катодных осциллографов и методики работы с ними.

Сообщение И. Стекольникова (СССР) касается катодного осциллографа мгновенного действия с внешней съемкой. Дается описание двух конструкций, названных осциллографами (одно- и двухлучевого), разработанных в БЭИ. После обсуждения преимуществ работы названных осциллографов по сравнению с аппаратами, работающими с длительно существующим лучом, приводятся некоторые осциллограммы, одна из которых доказывает возможность получения предельно больших (лимитируемых подвижностью электронов) скоростей записи.

В связи с рассмотрением схемы синхронизации дается описание разработанного автором светового реле ⁶, дающего

⁶ Подробно описано в „Электричестве“ № 6, 1936.

можность включения высоковольтных цепей, содержащих промежутки без всякой гальванической связи. Описание ряда усовершенствований катодного осциллографа дается в докладе А. Angelini.

Наиболее интересны следующие нововведения.

Устройство рабочей части катода из ленты, которая целиком заменена выгорающего в центре катода) может плавиться без нарушения вакуума, что позволяет длительно работать без разборки разрядной трубы.

Осуществление термохимического регулятора вакуума разрядной трубке с помощью разогрева металлической пружины, находящейся в капсуле (соединенной с полостью разрядной трубы), содержащей бикарбонат соды. Под влиянием развивающегося в сопротивлении тепла реактив выделяет газ, поступающий в разрядную трубку.

Осуществление временной цепи с почти линейным коном развертки. Необходимое для временных пластин напряжениеается от двух трансформаторов, питаящих магнитные выпрямители. Трансформаторы включены в сеть так, что сдвиг фаз даваемых ими напряжений составляет 90°. Напряжение снимается с двух сопротивлений, включенных между нейтралями трансформаторов и катодами обоих выпрямителей.

С целью уменьшения искажений, вносимых замедляющим кабелем, он заменен двумя проводниками, имеющими изолированные оболочки; один проводник покрыт медной сеткой. Проводники намотаны на металлический каркас, причем расположение витков выбрано так, чтобы максимально уменьшить индуктивность проводки.

Ряд конструктивных особенностей в двух- и трехлучевых осциллографах описан в докладе М. Kasai. Пояснения лучше всего дается к тому, что электронный пучок, выходящий из отверстия анодной диафрагмы (сделанной из угля с диаметром диафрагмы около 1,5 мм) после прохождения через магнитное поле концентрирующей катушки, экранированной железом, подразделяется на части (две или три) специальной пластиной (или двумя пластинами). Отщепленные пучки, каждый помимо двух пар отклоняющих пластин, получают нужное направление и посыпаются в отклоняющую камеру и после прохождения между пластинами явления и времени, падают на фотографическую кассету. Осциллограф построен как длительно действующий (с ограниченным временем ожидания). В качестве запирающего реле использованы конденсаторные пластинки, расположенные над концентрирующей катушкой под анодной диафрагмой.

Синхронизирующими реле служат термоионные лампы, работающие по схеме кипреле. Время действия реле по исследованиям автора имеет порядок 0,35—0,5 мсек.

Kasai в своем докладе описывает также интересные схемы для быстрого включения шлейфовых осциллографов. Принцип, использованный в одной из схем, заключается в том, что в состоянии ожидания свет, отраженный от зеркальца шлейфа, не падает на фотографическую бумагу. Шлейф состоит из двух независимых электрических цепей, одна из которых связана с анодной цепью термоионной лампы, а другая — с целью, в которой протекает изучаемое явление. В состоянии ожидания сетка лампы отрицательна и тока в ее анодной цепи нет.

В начальный момент изучаемого нестационарного процесса специальное реле (состоящее из ламп Mazda) делает потенциал сетки термоионной лампы положительным и тем самым включает ток в цепь шлейфа, отчего шлейф занимает положение, при котором световой зайчик падает на фотографический барабан. Благодаря одновременному появлению тока во второй цепи шлейфа на барабане начинается регистрация изучаемого явления. По данным автора время включения меньше 0,001 сек.

В заключение M. Kasai кратко описывает измерения, проведенные в одной из высоковольтных японских систем в течение ряда грозовых сезонов. Несколько катодных осциллографов, полученных двухлучевым осциллографом, показывают благотворное влияние сопротивления в нейтрали трансформатора на величину перенапряжений на ней при воздействии на обмотку импульсов напряжения, пришедших по линии передачи.

Интересную тему о возможных ошибках при использовании катодных осциллографов в индустриальных условиях рассматривают в своем докладе J. Jakubowski и A. Rankin. Кратко упомянув о некоторых известных источниках ошибок при осциллографировании высоковольтных явлений, авторы подробно останавливаются на разработанном ими приближенном методе определения погрешностей, вносимых в регистрируемое явление в тех случаях, когда за время τ пробега электроном длины l отклоняющие пластины между нейтралями трансформатора.

следующими происходят существенные изменения напряжения. Элементарный анализ вопроса показывает, что если интеграл времени регистрации менее, чем время τ , осциллограмма изображает не само подводимое к отклоняющим пластинам напряжение, а его интеграл. Описываемый метод заключается в том, что по записанной осциллограмме можно, пользуясь уравнением

$$U - U_{t-\tau} = \tau \frac{dy}{dt},$$

где $U_{t-\tau}$ — напряжение, существовавшее на пластинах в момент $t - \tau$, а

$\frac{dy}{dt}$ — производная, взятая по осциллограмме для данного времени t , графическим или аналитическим путем найти напряжение U , действовавшее на отклоняющие пластины.

Для получения из осциллоGRAMмы истинного напряжения U_0 , подводимого к отклоняющим пластинам емкости C по двухпроводной линии с волновым сопротивлением Z , можно воспользоваться уравнением:

$$U_0 = U + ZC \frac{dU}{dt}.$$

Например, при фронте волны

$$U = f(t),$$

соответствующем полупериоду в $0,5 \cdot 10^{-6}$ сек, при

$$Z = 500\Omega \text{ и } C = 15 \cdot 10^{-12} \text{ F},$$

величина отклонения

$$\frac{U_0 - U}{U} \cdot 100$$

составляет 4,5%.

Два доклада посвящены обзору существующих методов измерений весьма высоких напряжений.

K. Drewnowski подразделяет измерительные установки на следующие 5 групп:

1. Электрометрические, в которых используются силы, возникающие в электростатическом поле под влиянием измеряемого напряжения.

Сюда относится классический прибор — электрометр, на принципе которого выполнены многочисленные модификации для измерения высокого напряжения. Широкое распространение имеют электростатические вольтметры. В настоящее время сконструирована установка из шарового разряда, имеющая подвижный электрод, получающий перемещение под влиянием приложенного поля. Этот метод измерения заслуживает большого внимания.

2. Установки с делителями напряжений, в которых изменяется часть напряжения, подведенного к делителю.

В качестве делителей при очень высоких напряжениях, используются обычно конденсаторы. Индикаторами напряжения служат электрометры или электростатические вольтметры, неоновые лампы, осциллограф.

Проблема создания неискажающих делителей на весьма высокие напряжения еще не решена.

3. Выпрямительные установки, в которых выпрямляется зарядный ток конденсаторов, включенных на измеряемое напряжение.

Примером может служить распространенная система Chubb-Haefely, состоящая из двух кенотронов, соединенных параллельно (с катодами, нагреваемыми от постоянного или переменного тока), и микроамперметра, соединенного последовательно с компенсационной, аккумуляторной батареей в цепи одного кенотрона. Эта система, включенная между конденсатором и землей, находится под низким напряжением.

Названный метод имеет многочисленные модификации.

[В небольшом докладе E. Forey дается описание некоторых усовершенствований Haefely, сводящихся к исключению влияния встречающейся в практике разницы частот напряжений (одного используемого для нагрева катодов, а другого — измеряемого) и устранению ошибок, происходящих от изменения напряжения компенсационной батареи].

В последнее время Holzer использовал один конденсатор высокого напряжения для выпрямительной установки и для

делителя напряжения совместно с электростатическим вольтметром и осциллографом.

4. Установки с использованием неполного разряда, в которых наблюдаются явления ионизации, происходящей под влиянием измеряемого напряжения.

Здесь называются два типа вольтметров: коронный и вольтметр ионного ветра.

Принцип первого устройства заключается в том, что наблюдается появление короны на внутреннем электроде цилиндрического конденсатора со сжатым воздухом. Наблюдение ведется либо непосредственно, визуально, либо регистрируя моменты появления тока в гальванометре или телефоне.

Идея вольтметра с ионным ветром заключается в следующем: нагреваемый электрод, находящийся под очень высоким напряжением, включен в плечо моста Уитстона. Под действием ионного ветра электрод охлаждается, отчего меняется сопротивление плеча мостика и гальванометр системы отклоняется. Система имеет весьма большую чувствительность. Точность ее доходит 0,02%. Существуют установки на напряжение до 200 кВ.

5. Разрядники, при помошь которых наблюдается полный разряд, обусловленный измеряемым напряжением.

Из всех существующих типов искровых промежутков цилиндрические, игольчатые, плоские и др. — наилучшими являются шаровые разрядники. Громадное количество исследований, посвященных механизму действия этого типа искрового промежутка, дало возможность установить источники погрешностей и дать поправки к калибровочным кривым для измерений переменного напряжения, воспроизведенных теперь с удовлетворительной точностью в различных лабораториях.

Работа по стандартизации градуировки шаровых разрядников импульсным напряжением продолжается.

Нужно отметить, что Drewrowski в своем докладе совершенно не касается ряда методов измерения напряжений с помощью катодных осциллографов, электронной оптики и др. В этом отношении упомянутый здесь доклад дополняет доклад A. Palm. Не рассматривая во избежание повторения его сообщение подробно, приведем таблицу, дающую сводку наиболее важных методов измерений высоких напряжений и их критическую оценку (табл. 2).

Обзору докладов этой группы следует добавить рассмотрение еще одного сообщения, сделанного E. Rupno-Vapori и C. Dipieri. В целях расширения диапазона напряжений, которые можно измерять при помощи шаровых разрядников, имеющих один шар заземленным, авторы предлагают исследованный ими метод устройства охранных колец. Конструктивный вид предлагаемого мероприятия изображен на рис. 8. Рекомендуемые размеры (мм) даются в табл. 3.

Эффект действия охранных колец, как показали опыты, проделанные с переменным и импульсным напряжением, сводится к увеличению пробивных градиентов и, следова-

тельно, к увеличению измеряемых данным разрядником напряжений.

Помимо этого, защитные кольца экранируют пространство, в котором происходит разряд, от влияния окружающих предметов, благодаря чему уменьшается разброс при измерениях, наблюдающийся особенно при расстояниях, больших половины диаметра сфер.

Четвертая группа докладов. По разрядникам имеется 5 докладов, посвященных в основном изложению последних достижений в области построения различных типов защитных аппаратов и изложению данных их эксплуатации.

С. Ledoux описывает разрядник LS, уже известный в докладе автора, представленного на конференцию 1935 г.

В качестве материала в разряднике использован карбозиц,

имеющий (на постоянном токе) характеристику $U = R \cdot \ln \frac{a}{a - 1}$ ($a = 0,33$).

В принципе разрядник представляет собой комбинацию из карбозицальных дисков, помещенных в фарфоровый цилиндр и разделенных слюдяными прокладками. Диски являются одновременно электродами искровых промежутков.

Из приводимых осциллограмм и вольтамперных характеристик видно, что при работе разрядника на импульсах верхняя часть вольтамперной петли поднимается более круто, чем характеристика карбозиала на постоянном токе, что указывает на увеличение значения a .

Из характеристики разрядника LS на напряжение 15 кВ определяются: напряжение зажигания — 56 кВ (амплитудное значение), напряжение гашения — около 27 кВ, максимальное напряжение при импульсном токе 1500 А, равное приблизительно 62 кВ.

Для разрядников на рабочее напряжение до 8,5 кВ гарантированный максимальный ток импульса (волна 25—30 мсек до половины спада) установлен 1400 А. Соответственно для разрядников на напряжение до 40 кВ — 1600 А и на напряжение до 85 кВ — 2000 А.

Для защиты тяговых систем постоянного тока изготовлены специальные карбозицальные сопротивления, которые включаются в сеть между фазой и землей без искровых промежутков. Ток, протекающий через сопротивление, изменяется в пятой степени от напряжения. Сопротивления рассчитаны на отводы токов порядка 2000 А. S. Teszner представил доклад на тему „Эксплоатационный опыт и новейшие достижения в технике разрядников“, в котором сообщает об итогах большой исследовательской работы, проделанной в лаборатории фирмы Merlin и Gerin (Франция).

В течение двух лет фирма не прекращала интенсивной работы по улучшению выпускаемого ею разрядника типа STC искровым промежутком с магнитным дутьем.

В основном работа велась в направлении увеличения амплитудного значения импульсного тока, безболезненно пропускаемого разрядником. В качестве материала сопротивления была изготовлена масса, получившая название Maxivar, имеющая петлевую вольтамперную характеристику.

Teszner дает выражение для характеристики материала в виде зависимости $I_2 = I_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^n$, указывая, что величина n при умеренных токах достигает 5, а при больших токах доходит до 6 (что соответствует значениям $a = 0,2$ и $0,16$).

Однако из приводимых вольтамперных характеристик, снятых катодным осциллографом, можно видеть, что значение a значительно больше вышеизложенных.

Прогресс в изготовлении сопротивлений автор доклада иллюстрирует также цифрами токов I_m , измеренных при напряжении $2U$. Величина I_m в стадии усовершенствования Maxivar поднялась от значения 250 А до значений 1300—1400 А. В докладе отмечается большая надежность и стабильность сопротивлений в эксплуатации.

Считая характеристики разрядника весьма совершенными, автор полагает, что единственным препятствием к широкому распространению аппаратов является их относительно высокая стоимость. В целях снижения цены в разрядниках введен ряд конструктивных изменений, способствовавших значительному уменьшению размеров. Наиболее существенным изменениям подверглись искровые промежутки, снабженные катушками для магнитного дутья. Более рациональное расположение обкладок электродов и катушек дало возможность уменьшить размеры искровых промежутков, не ухудшая их обрывных качеств. Величина тока рабочей частоты, который может быть оборван в течение времени, меньшего 0,01 сек, достигает 200 А максимальных. В целях большей надежности характеристики разрядники подбираются таким образом, чтобы ток последействия не превышал 100 А максимальных.

Касаясь в заключение вопроса защиты стационарной и линейной изоляции, автор считает, что установкой разрядников на станциях и подстанциях аппаратура, безусловно, может быть защищена от разрушения атмосферными разрядами. В отношении защиты линейной изоляции задача не может быть полностью решена по экономическим соображениям. Teszner подчеркивает опасность „переизоляции“ линейной изоляции без принятия соответствующих мер защиты стационарной аппаратуры.

В докладе C. Bresson, написанном на тему „Установление условий и характеристики для конструируемых разрядников“,

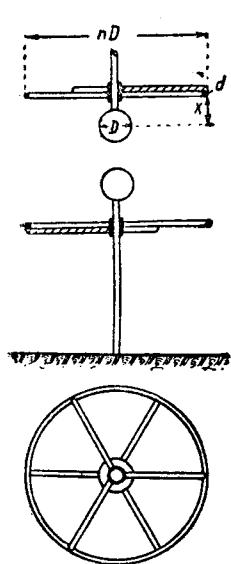


Рис. 8. Экранированный шаровой разрядник

Таблица 2

Сводка высоковольтных измерительных установок и их важнейших особенностей

Метод измерения	Погрешность, %	Род напряжения	Употребляются как стандарт N для измерений G , для демонстрации V	Градуировка	Выполнено для предела напряжения kV	Отклонения от других методов измерения	Определяющие соотношения	
							$U_{\text{постоян}}$	U_{eff}
1 Брауновская трубка, катодный осциллограф	—	0	— 0	G, V	— 0	200	—	$U = \frac{m_0}{e} \frac{v^2}{2\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad v - \text{скорость электронов}$ $m_0, e = \text{const}$
2 Электронная оптика	1	0	— 0	V	0	— ... 40	—	$\frac{1}{f} = \frac{1}{8} \sqrt{\frac{E}{U_a}} \cdot F \left(\frac{U}{E} \right) \quad \begin{matrix} f - \text{фокусное расстоян.} \\ E - \text{напряж. линзы} \\ U_a - \text{анодное напряжение} \\ U - \text{измеряем. напряжение} \end{matrix}$
3 Электронная дифракция	0,6 до 0,8	0	— 0	N	— 0	70 ... 280	—	$\lambda(\text{\AA}) = \sqrt{\frac{149,1}{U_{\text{(volt)}}}} \quad D - \text{диаметр кольца дифракции}$ $L - \text{расстояние фольгопластина}$ $\lambda = k \cdot \frac{D}{L}$
4 Рентгеновский спектр	1	0	— 0	N	0	— ... 180	Амплит. напр. на 2,7% < вольтметра Starke-Schröder и 1,5% ≠ шаровым разрядником	$h\nu = eU$ $v = c/\lambda$ $U_{\text{kV}} = \frac{12,34}{\lambda_{\text{min}}(\text{\AA})}$
5 Ионно-ветровой вольтметр	1	—	0 *	$(G), V$	— 0	... 300	—	
6 Керрэфект	—	0	— 0	$G, (V)$	— 0	7 ... 25 kV/cm	< 3% относительно коэф. трансформации тр-ора	$\varphi = B \cdot l \xi^2 \quad \varphi - \text{угол отклонения света}$ $\xi - \text{кв/см}; B - \text{Керркоэф}$ $l - \text{длина диэлектрика}$
7 Ротационный вольтметр	—	0	— 0	G, V	— 0	... 800	7% шаров. разрядников	$I_{\text{galv}} = 2CU_n \quad C - \text{емкость цилиндрич. конденсат.}$ $n - \text{число оборотов}$
8 Емкостный делитель напряжения и электростат. вольтметр низкого напряж.	1	—	0	G	— 0	... 1000	и 8% > шаров. разрядник.	$U = U_2 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$
9 Омический делитель напряжения и дополнительное сопротивление	1,5	0	0	G	— 0	... 150	—	$U = U_1 \frac{R}{R_1}; \quad U = IR$
10 Индуктивный делитель напряжения (каскадн. тр-ор)	1	—	0	G	— 0	... 250	—	$U_1 = \dot{U} \frac{R}{R_1}; \quad U_2 = \dot{U} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \dot{U} - \text{коэффициент трансформации}$
11 Измерение зарядного тока (Chubb, Haefely)	0,6 до 1,0	—	0	G	— 0	... 1000	0,6% < Graighead, см. № 8	$U = \frac{M(l)}{2 \cdot f \cdot c} = KL \quad M(l) - \text{среднее значение тока}$
12 Измерение амплитудных значений Sharpe, Doyle и Graighead	1,5	—	0	G	— 0	... 1000	См. № 11	Делитель напряжения, как в № 8
13 Электростатический вольтметр Abraham-villard, Starke-Schröder	1	0	0	G	— 0	... 500	См. № 4	$\rho = K\xi^2 = K \frac{U^2}{S^2}$
14 Шаровой вольтметр по Huetter	1	0	0	$(N), G, V$	— 0	... 1000	—	Как в № 13
15 Вольтметр с сжатым газом Thomson-Palm-Frank	0,1	0	0	N, G	0	... 360	—	Как в № 13
16 Эллипсоидный вольтметр Thornton	0,1	0	0	N, G, V	0	... 1000	—	$\xi = \frac{U}{S} = K \sqrt{n^2 - n_0^2}; \quad n - \text{число колебаний в электростатич. поле}$ $n_0 - \text{число колебаний без поля}$
17 Вольтметр тлеющего разряда Palm	1	—	0	G	— 0	... 1000	0,8% < Chubb	Напряжен. зажигания постоянно, делитель напряж., как в № 8
18 Коронный вольтметр Whithhead	1	0	— 0	—	— 0	20 ... 140	—	$\xi = 1,25 \xi_0 \delta + 12,3 (\delta/r) \sqrt{\delta}$ $\delta = 1 \text{ при } 0^\circ \text{C} \text{ и } 760 \text{ Торр}$ $r - \text{радиус проводки}$
19 Вольтметр граничного напряжения Goepfer	2	—	0	G	— 0	... 1000	—	
20 Клиодонограф	15	0	— 0	G, V	— 0	... 1000	—	$r \sim p^{-4/3} \quad r - \text{радиус фигуры}$ $p - \text{давление воздуха}$
21 Шаровой искровой промежуток Игольчатый искровой промежуток	0,5 до 8	0	— 0	G, V	— 0	... 2000	См. № 4, 7, 8	Шаров. разр. $U_{\text{eff}} = 8 \cdot 19,6 \left(1 + \frac{0,757}{\sqrt{\delta \cdot D}} \right) D \left[\frac{S}{D} \cdot \frac{1}{f} \right]$ Игольч. разр. $U_{\text{eff}} = 15,4 + 4,74S$
22 Плоско-электродный искровой промежуток	0,1	0	— 0	G, V	— 0	... 500	—	$\xi = \frac{U}{S} = \xi_0 \cdot \delta + 7,54 \sqrt{\delta \cdot S}; \quad S - \text{разрядное расстояние}$

* Встречается в ограниченном количестве

автор рассматривает наиболее важные факторы, влияющие на конструирование современных разрядников.

Анализируя характеристики для разрядника напряжения, автор принимает напряжение гашения U_2 равным $1,2U_n$ (U_n —номинальное напряжение), а напряжение зажигания $U_3 = 2U_2 = 2,4U_n$.

Напряжение, при котором разрядник практически может быть использован вне зависимости от состояния нейтрали системы, должно находиться в пределах $0,75U_n \leq U \leq 1,2U_n$. Так например, разрядник на номинальное напряжение 10 kV, у которого, следовательно, $U_3 = 24$ kV, а $U_2 = 12$ kV, может работать в системах с изолированной нейтралью при напряжениях от 7,5 до 12 kV, а при заземленной наглоухо нейтрали при напряжениях системы от 7,5 до 16 kV ($\frac{10-12}{0,75}$).

Касаясь вопроса изготовления сопротивлений, Bresson говорит, что в основном масса состоит из карборунда с добавлением в нее для увеличения проводимости графита или силиция. Эти компоненты связываются одним из следующих материалов: керамической глиной или фарфоровым тестом с обжигом при температуре, превышающей 1000°; силикатом соды с обжигом при температуре от 200 до 800°; цементом, например магнезиевым, без обжига.

Далее автор указывает на зависимость вольтамперной характеристики от числа приложенных к материалу импульсов и температуры материала.

Много внимания в докладе уделяется анализу распределения напряжения по искровым промежуткам разрядника.

Рассматривая цепочку конденсаторов, образованную емкостями электродов и искровых промежутков между собой C_0 и на землю C , автор приходит к приближенной формуле, определяющей напряжение U_t на всем искровом промежутке в момент, когда разность потенциалов на первой паре электродов достигает величины разрядного напряжения U_a .

$$U_t = U_a n \left(1 - \frac{n-1}{2} \cdot \frac{C}{C_0} \right).$$

Функция $U_t = f(n)$ имеет максимум. Пользуясь этим, можно определить число n в зависимости от $\frac{C}{C_0}$:

$$n = \frac{1}{2} + \frac{C_0}{C} !$$

Если, например, $\frac{C}{C_0} = 0,0245$, $n = 41$.

В докладе даются соотношения для определения численных значений C и C_0 по геометрическим размерам; конечно, нужно учитывать приближенность аналитических методов и в ответственных случаях предпринимать экспериментальную проверку.

В целях достижения более быстрого действия искровых промежутков автор рекомендует шунтировку одного искрового промежутка омическим сопротивлением. Действие этого промежутка при величине сопротивления порядка $\frac{1}{\omega C}$,

где C — величина емкостей, шунтирующих остальные искровые промежутки, при напряжении рабочей частоты не значительно. При импульсах большая часть напряжения ложится на искровой промежуток, шунтированный сопротивлением, который быстро пробивается. Этот разряд с крутым спадом напряжения по мнению автора способен уменьшить диэлектрический коэффициент и, следовательно, вызвать увеличение импеданца конденсатора и подъем напряжения на его арматуре, что обусловит действие второго промежутка. Это в свою очередь облегчает и ускоряет разряд во всех остальных промежутках.

Рис. 9. Общий вид разрядника

1, 2, 6, 9 — металлические части; 3, 7 — фарфоровый кожух; 4, 5 — электроды искровых промежутков; 8 — диски сопротивления

В докладе приводится схематический разрез разрядника, состоящего из двух фарфоровых элементов, в одном из которых помещаются диски сопротивления, а в другом, расположеннем над первым, — искровые промежутки электроло-

(рис. 9). Благодаря особой форме электродов образовавшаяся при горении дуги повышенное давление газа используется для гашения дуги. Характеристики работы разрядника отсутствуют.

E. Norris в своем докладе приводит новые данные, которые должны подтвердить мнение автора относительно очень хорошего защитного действия поглотителей волн (абсорберов).

Приводимый им ряд катодных осциллограмм показывает, что при наличии упомянутого аппарата происходит существенное уменьшение разности потенциалов на части трансформаторных витков, примыкающих к линейному концу. Вместе с тем следует отметить некоторое увеличение на 12–17% амплитуды волны, вызываемое поглотителем. Ис-

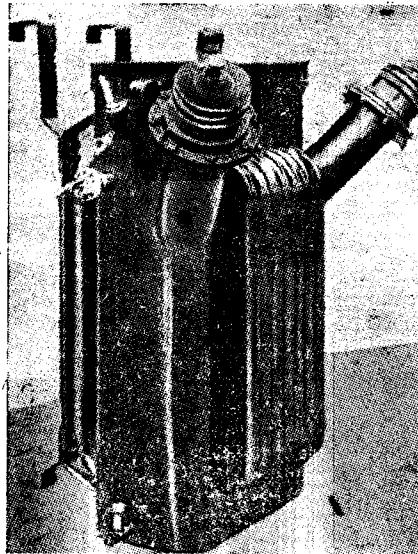


Рис. 10. Общий вид распределительного трансформатора с встроенными в него абсорберами

следования производились с волнами 0,6/40 и 0,5/5 μ sec. Абсорбером служил аппарат типа СС на ток 5A и напряжение 8 kV.

Фотография на рис. 10 иллюстрирует распределительный 11-kV трансформатор с монтированными на нем абсорбераами.

Norris приводит выдержки из отзывов эксплуатации, в которых подтверждается благоприятный эффект абсорберов в отношении защиты трансформаторов от волн. Общие суждения автора о целесообразности защиты станционной изоляции и методах ее выполнения остались в основном такими же, какими они были изложены в докладе 1935 г., подробное рассмотрение которого с критическими замечаниями было сделано на страницах этого журнала⁷.

В докладе, представленном из Будапешта, O. Szilas и E. Szepesi рассматривают роль искрового промежутка, шунтирующего часть сопротивления разрядника. Принцип работы разрядника поясняет рис. 11. Вначале при набегании на разрядник волны перенапряжения происходит пробой промежутка A . Если падение напряжения на сопротивлении cd делается достаточно большим, происходит пробой вспомогательного промежутка B , благодаря чему часть сопротивления cd закорачивается, и при правильно подобранных параметрах цепи напряжение остающееся на разряднике, уменьшается. В докладе описывается метод графоаналитического построения расчетных характеристик. На рис. 12 изображен разрез разрядника со вспомогательным промежутком. Авторы указывают, что описанный принцип дает возможность увеличить эффективность разрядника на 20–25%.

Группа докладов нормативного характера. К конференции 1937 г. ряду лиц комитетом было поручено подготовить три сообщения нормативного характера, которые предлагались на обсуждение конференции.

Доклад M. H. M. Laceу представляет собой словарь, в котором дан перевод наиболее распространенных английских слов на французский язык. Термины сопровождаются уточ-

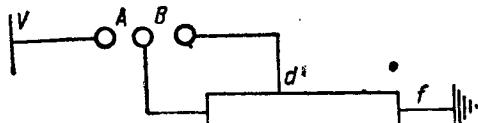


Рис. 11. Принципиальная схема действия разрядника с дополнительным искровым промежутком

V — защищаемая линия, A — гасительный искровой промежуток, B — вспомогательный искровой промежуток, приключенный к части $c-d$ сопротивления c ,

иющими их смысл разъяснениями. Всего рассматривается 41 слово.

Доклад К. Beiger под названием «Положения для разрядников» составлен с учетом уже существующих в некоторых странах положений. В содержание доклада входят следующие вопросы: назначение разрядников и основные определения; действующие нормативы; определения; правила маркировки разрядников; правила испытания разрядников (эффект защиты, определение функционирования, устойчивость при влиянии различных факторов и испытание элементов).

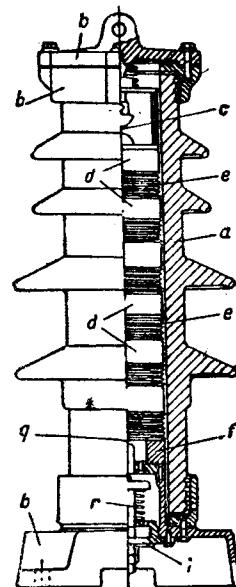
A. Matthias представил доклад на тему «Степень электрической надежности высоковольтных систем и рассмотрение градации и координации изоляции».

Под степенью надежности автор понимает отношение электрического сопротивления изоляции (под этим термином следует понимать напряжение перекрытия или пробоя рассматриваемой изоляции) к напряжениям, возникающим при эксплоатации. Названную величину можно представить как произведение величин: коэффициента сопротивляемости, представляющего собой отношение сопротивления (вернее уровень) изоляции к величине перенапряжения, и коэффициента опасности, отношение максимальной величины перенапряжения к максимальному значению напряжения при нормальной эксплоатации).

Анализируя возможные источники перенапряжений и указывая различные условия работы высоковольтной аппаратуры, Matthias приходит к заключению, что нельзя дать фиксированных значений коэффициентов опасности для различных

Рис. 12. Общий вид разрядника

a — фарфоровая рубашка, b — чугунная арматура, c — изолирующий искровой промежуток, d — сопротивление, e — гасящие искровые промежутки, f — пластина сопротивления, g — вспомогательный искровой промежуток, h — предохранительный клапан, i — пружина



напряжений. Можно лишь заключить, что этот коэффициент уменьшается по мере роста рабочего напряжения системы. Величина коэффициента сопротивления для данного аппарата может быть определена испытанием. По соображениям технико-экономического порядка величина коэффициента устанавливается различной.

Среди большого числа предложений по градации уровней изоляции по степени надежности автор различает три группы:

1. Изоляция линии до максимально возможной величины. Весьма большие перенапряжения должны отводиться специальными защищными устройствами.

2. Изоляция линии делается такой, что напряжение, остающееся после перекрытия линейной изоляции, не может вызвать порчи стационарного оборудования.

3. Вблизи станций устраиваются точки ослабленной изоляции, которые выполняют функции, указанные в п. 2.

Анализируя современное состояние воздушных линий и электросистем в целом, Matthias приходит к выводу о невозможности наметить общее решение вопроса о координации изоляции. В заключение автор доклада делает ряд замечаний, которые необходимо иметь в виду при осуществлении градации изоляции системы. Эти замечания можно считать известными и в основном принятыми в нашей практике.

ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Б. С. Якоби и его работы над проблемой электродвигателя

М. И. Радовский
Ленинград

20—30 годы прошлого столетия представляют собой один из наиболее интересных периодов в истории науки и техники. В это время возникло и разрослось в самостоятельную отрасль электричества учение об электромагнетизме. Именно этот период необычайно богат многочисленными открытиями, теоретическими исследованиями и глубокими обобщениями, составившими основу современных возврений на природу таких важных областей естествознания, какими являются электричество и магнетизм. В то же время новые открытия послужили базой, на которой возникла самая революционизирующая отрасль техники — электротехника.

Два явления — электромагнитное вращение и электромагнитная индукция, открытые великим английским ученым Михаилом Фарадеем в 1822 и в 1831 гг., дали толчок творческой мысли изобретателей к постройке машин, превращающих электрическую энергию в механическую и генерирующих электрический ток.

Проблема механического двигателя на всем протяжении развития производительных сил была и остается одной из самых актуальных в технике. В эпоху промышленного переворота решение этой задачи выразилось в изобретении паровой машины, которая, по образному выражению Маркса, перевернула в XVIII в. все вверх дном.

Маркс также первым высказал мысль, что практическое

использование электрической энергии сыграет несравненно большую роль в историческом развитии человеческого общества. Именно в электрическом двигателе он видел исходный пункт нового технического прогресса.

Первые изобретатели электрических машин, конечно, не представляли себе, с какой огромной важности задачею они имеют дело. Было только ясно, что трудами Фарадея открыт какой-то новый источник, который может благотворно подействовать на развитие силового хозяйства. После появления первой модели электродвигателя «игрушечного типа» известный американский ученый Б. Силиман написал:

«Наука совершенно неожиданно дала нам в руки новую силу большой, но незнакомой еще нам энергии. Эта энергия не вызывает ветров из пейзажей, не придает крыльев воде через посредство тепла, не истощает мускульную силу животных, не требует сложных механизмов, не аккумулирует гидравлическую силу, преграждая путь разъяренным потокам, не собирает воедино всяную другую форму силы тяжести; нет, при помощи самых простых средств — соприкосновения металлических поверхностей малых размеров, при помощи слабых химических реактивов¹ возникает загадочным образом энергия, рассеянная

¹ Первые электродвигатели питались током от гальванических батарей (Примеч. автора).

повсюду в природе, непознаваемая нашими чувствами; эта энергия увеличивается еще более загадочным путем, перемещаясь в изолированной проволоке, увеличивается в тысячи и тысячи раз, пока не проявляется с невероятной силой, между ее зарождением и полной зрелостью нет промежутка; ребенок сразу рождается гигантом».

Наиболее прозорливым изобретателям недостатки паровой машины были ясны еще в 30-х годах, т. е. именно тогда, когда этот двигатель завоевывал все новые области народного хозяйства. В научных и технических кругах того времени все чаще и чаще раздавались необычайно смелые голоса. Особенно увлекавшиеся оптимисты даже предсказывали близкое торжество электрических двигателей и скорый конец паровых машинам. Немецкий проф. Александр выступил в 1841 г. со статьей в одном техническом журнале, где он специально подчеркивал неосторожность многих высказываний относительно того, что час паровой машины, пробил и что наступает эра электродвигателей.

«Со всех сторон, — писал Александр, — как внутри страны, так и за границей, доходят в последнее время вести о том, что электромагнетизм удалось использовать в качестве движущей силы в большом масштабе. Все стремятся доказать многие и большие преимущества этой новой силы по сравнению с паром и ожидают от электромагнетизма не меньше, чем полное вытеснение пара. Если бы некоторые надежды, особенно теперь еще, не были слишком сангвиническими, то пару, пришествия которого мы ожидали с таким нетерпением, пришлось бы дрожать за свою судьбу. Однако в этом факте мы усматриваем гигантский рост естественных наук и их технического применения в нашем столетии. Применение пара в качестве движущей силы имеет уже долголетнюю историю. Прошло уже 143 года с того времени, как Сэвери из Лондонского Королевского общества впервые построил работающую модель паровой машины и получил на нее патент. Должно было пройти еще 80 лет, пока не появился всемирно известный шотландец Джемс Уатт и своим творческим гением коснулся паровой машины. Гальваническое электричество, которое зарождает нашу новую силу, появилось всего лишь 50 лет назад. Возбуждение магнитной силы в мягком железе под влиянием этого электричества стало известно нам 16 лет назад. Попытки применить эту новую силу для практических целей имеют всего лишь семи-восьмилетнюю давность, и уже говорят об электромагнитных локомотивах».

В этой эпохе напряженных исканий работал и Б. С. Якоби над своей конструкцией электродвигателя.

Вопросами электромагнетизма Якоби занялся под влиянием всеобщего внимания, которое привлекло к себе явление, описанное датским ученым Гансом Христианом Эрстедом в 1820 г. в его знаменитом трактате. Это явление окончательно уяснило связь между электричеством и магнетизмом, которую многие ученые тщетно пытались установить на протяжении многих лет. Научный мир так заинтересовался новым открытием, что в 20-х годах прошлого столетия электромагнетизм выдвинулся, как центральная естественно-научная проблема. Исследователи самых различных областей науки занялись изучением новой отрасли учения об электричестве.

Американский ученый Джозеф Генри, обогативший науку об электричестве чрезвычайно важными исследованиями (он независимо от Фарадея, хотя и несколько позже, открыл электромагнитную индукцию), построил в 1831 г. прибор, который может рассматриваться, как прототип электродвигателей, питаемых током от гальванических батарей. Сам автор большого значения своему изобретению не придавал, говоря, что оно представляет только «физическую игрушку».

Почти одновременно с Генри подобные же попытки производились и в других странах, главным образом в Англии.

Английские изобретатели строили свои аппараты на принципе вращательного движения, Генри же и более поздние конструкторы применяли возвратно-поступательное движение. Однако и английские изобретения дальше физических приборов не пошли.

Первая попытка создать электродвигатель, практически пригодный для производственных целей, принадлежит Б. С. Якоби.

В мае 1834 г. он построил первый «магнитный аппарат», как он называл свою конструкцию. В том же 1834 г. Якоби сообщил Парижской Академии наук о своем изобретении, а через год опубликовал трактат: «О приме-

нении электромагнетизма для приведения в движение машин», изданный на французском языке.

Само название трактата свидетельствует о широком понимании автором проблемы электродвигателя. Предшественники Якоби, как и современные ему изобретатели, рассматривали свои изобретения как научные аппараты, которые пока могут найти себе место только в физических кабинетах. Их робкие надежды не шли дальше предположения, что практическое применение новый двигатель найдет лишь в некоторых областях и не ранее отдаленного будущего. Якоби жеставил свое изобретение в непосредственную связь с проблемой универсального двигателя. Как известно, Маркс находил, что гений Джемса Уатта заключается именно в том, что патент, взятый им в апреле 1784 г., давая описание паровой машины, изображает ее не как изобретение для особых целей, но как универсальный двигатель крупной промышленности».

Широта понимания технических проблем, несомненно, ставит Якоби в один ряд с Уаттом. Но Якоби работал над неблагодарным изобретением: по природе своей двигатель, питаемый током от электрохимического генератора, был обречен на неудачу вследствие экономической неэффективности. Однако труд, потраченный Якоби, не был ни в коей мере бесплодным и работа его представляет один из замечательных этапов истории электротехники.

Отличительной чертой исследования Якоби является всесторонний характер изучения проблемы от генератора до последней детали конструкции двигателя.

В то время, имея в виду практическое приложение, можно было говорить только о двух генераторах электрической энергии: электрохимическом — гальванические элементы, и термоэлектрическом — термоэлементы. В смысле мощности второй явно уступал первому и изобретатели имели дело только с «гальваническим током», как тогда называли ток от электрохимического генератора. Якоби же пытался применить и термоэлектричество. Это объясняется не только любознательностью естествоиспытателя. Ведя постоянно самые тщательные экономические расчеты и ни на минуту не забывая об издержках по эксплуатационным расходам, Якоби в то же время прекрасно понимал и относительность всех показателей. Дороговизна термоэлементов в эксплуатации могла бы оказаться преодолимым моментом, если только удалось бы усовершенствовать генератор. Тем более, что генератор этот насчитывал всего несколько лет существования (термоэлектричество было открыто Зеебеком в 1821 г.) и все дело, казалось, состояло в том, чтобы тщательно разработать проблему термоэлектричества.

Якоби в работе над использованием термоэлектричества интересовался чисто техническими моментами. После ряда опытов он установил, что в случае применения «термоэлектрических батарей для приведения в движение машин реакция магнитоэлектрических токов, развиваемых движущимся магнетизмом и направленных против намагничивающего тока, будет ослаблять последний и тем более, чем быстрее будет происходить вращение машины. Этот дефект отсутствует в электрохимическом генераторе, и в вопросе выбора генератора Якоби не шел по обычному пути: он остановился на электрохимическом генераторе после тщательного исследования, доказавшего неоспоримые преимущества последнего.

Исследование генератора является весьма любопытным моментом в изысканиях Якоби. Но не в нем заключается самое важное, что отличает изобретения Якоби от его предшественников. Главной заслугой Якоби было то, что он в своем двигателе, предназначенном для широких промышленных целей, применил принцип вращательного движения.

Якоби, имевший большой опыт в строительстве мельниц, яснее, чем кто-либо другой из пионеров в области электродвигателя, сознавал всю выгоду непосредственного ротационного движения. Кроме того, как практик-техник он понимал — и это он подчеркивал в сообщении Парижской Академии наук, — что «постоянное круговое движение гораздо легче преобразовывать в другие виды движения, чем возвратно-поступательное движение».

Но не сразу Якоби пришел к идее добиться непосредственного ротационного движения. Укоренившиеся представления, связанные с принципами действия паровой машины, настолько довлели над мыслью изобретателей, что почти все они считали, что новый двигатель должен быть построен по образу и подобию паровой машины:

ливание и отталкивание магнитных стержней неоднократно толкало на аналогию с действием поршня в паровой машине. И Якоби долгое время отдавал этому дань. Не мог, — писал он — сначала отрешиться от идеи построить возвратно-поступательное движение, производимое следовательным притягивающим и отталкивающим действием магнитных стержней, а затем уже превратить это возвратно-поступательное движение в постоянное круговое известным в технике способом».

Необходимо отметить, что в своих расчетах Якоби пользовался данными паровой машины. Именно сравнительное изучение обоих двигателей укрепило его в мысли, что «магнитный двигатель» может быть эффективным в том случае, если он будет кинематически основан на принципе, отличном от примененного в паровой машине.

Известные шаги в этом направлении были сделаны еще до Якоби. Через некоторое время после открытия Фарадеем явления электромагнитного вращения английский ученый Петер Барлоу в своей работе «О магнитных притяжениях», изданной в 1824 г., описал изобретенный им аппарат, известный в литературе под названием «Компа Барлоу». Этот аппарат был построен на принципе вращательного движения.

Другой английский ученый Вильямс Риччи также принял принцип вращательного движения в своем аппарате, описанный им в 1833 г. в статье: «Опытные исследования по электромагнетизму и магнитоэлектричеству».

Однако ни тот ни другой не ставили себе задач практического применения двигателя.

Из трактата Якоби не видно, были ли он знаком с работами Барлоу и Риччи. Но вряд ли могут быть сомнения в этом. Якоби, будучи широко образованным ученым, был осведомлен о всех сколько-нибудь значительных работах в области электричества. Исследования же Барлоу и Риччи, особенно первого, относились, несомненно, к самым выдающимся. Но знал или не знал Якоби труды этих ученых, его заслуги от этого не умаляются. Первая попытка технического использования принципа вращательного движения принадлежит, конечно, ему.

В отличие от многих изобретателей, Якоби в своей машине применял не постоянные магниты, а электромагниты. Электромагнит был изобретен за несколько лет до появления первых электродвигателей и электромагнитных генераторов, но только через четыре десятилетия английский изобретатель Генри Уайлд догадался внедрить в широкую практику генератор, основанный на применении электромагнитов. Развитие электрических машин вообще является одной из наиболее поучительных страниц в истории техники. Необычайно высокий взлет творческой мысли, которая часто опережает события на многие десятилетия, сочетается здесь с консервативностью укоренившихся представлений, превращающихся в мозы дальнейшего развития.

Переходя к самой конструкции двигателя Якоби, необходимо отметить, что его машина первая представляла собой нечто технически завершенное, несмотря на небольшие размеры построенной им модели.

Машина Якоби описана им следующими словами: «Аппарат состоит из двух групп по 8 стержней мягкого железа, длиной по 7 дюймов и толщиной в один дюйм. Обе группы стержней располагаются на двух дисках под прямым к ним углом и симметрично одна по отношению к другой таким образом, чтобы полюсы приходились один против другого. Один из дисков неподвижен, другой вращается вокруг некоторой оси, благодаря чему группа подвижных стержней проходит мимо группы неподвижных на возможно более близком расстоянии от них. Все 16 стержней обмотаны 320 футами медной проволоки толщиной в одну с четвертью линии; концы обмоток соединяются с полюсами гальванической батареи. Масса вращающейся со скоростью шести футов в секунду части машины доходит до 50 фут., что дает весьма значительную живую силу. Полезная работа этого аппарата, измеренная прибором, аналогичным тормозу Прони, эквивалента работе поднятия груза в 10—12 фунт. на высоту в один фут в 1 сек. Успешная работа этой машины обусловлена удачной конструкцией коммутатора, осуществляющего перемену полюсов восемь раз за один оборот, т. е. восемь раз в $\frac{1}{2}$ или $\frac{3}{4}$ сек. (обычная скорость вращения машины), если раствор батареи состоит в слабо подкисленной воде, при которой едва заметно испарение газа».

Постоянно сравнивая новый двигатель с паровой маши-

ной, Якоби прежде всего обнаружил преимущества первого в смысле конструкции. «Механизм мотора, — подчеркивал он в сообщении Парижской Академии наук, — очень несложен по сравнению с паровой машиной». Особенно выгодным преимуществом двигателя Якоби считал то, что в нем «нет ни цилиндра, ни поршня, ни клапанов и т. д.», изготавление которых требует очень точной работы и стоит больших средств. Это обстоятельство было весьма важным. Усовершенствованные металлообрабатывающие станки появились после того, как были изобретены машины, с которым связаны первые этапы промышленного переворота конца XVIII в. Известно, например, что Джемс Уатт встретил серьезные затруднения при постройке своей паровой машины именно благодаря несовершенству токарных станков, на которых было очень трудно обточить цилиндр машины.

Второе преимущество, на которое указывал Якоби, заключалось в том, что в электродвигателях, в отличие от паровых машин, «нет также трения, благодаря которому теряется больше половины всей производимой работы; в этой машине потерю составляет только трение в подшипниках».

Далее Якоби указывает, что в случае применения электродвигателя нет опасности взрыва. В первой половине прошлого столетия применение паровой машины сопровождалось в некоторых случаях катастрофами.

Однако с самого начала обнаружилось препятствие значительно более трудное, чем вся совокупность дефектов паровой машины. Новый двигатель был экономически неэффективен в производстве. Генератор — гальванические элементы — оказался очень дорогим в эксплуатации. Многие изобретатели, в том числе и Якоби, сразу же это заметили. Но они полагали, что это объясняется тем, что электрохимический генератор находится еще в зачаточном состоянии и что первые серьезные изыскания разрешат проблему.

Через 8 лет после своего открытия электромагнитной индукции тока Фарадей писал Якоби: «Я желал бы знать возможную стоимость получаемой энергии. Но я при этом имею в виду, что при первых практических попытках расходы ни в коей мере не являются мерилом цены, по которой в конце концов энергия может быть получаема. Я только мечтаю об установке электромагнитной машины на «Great Eastern» или «British Queen» (крупнейшие пароходы того времени, авт.) и отправить их через Атлантический океан или даже в Восточную Индию. Какое это было бы славное дело!»

Эти строки написаны в 1839 г. Но и 40-е годы полны многочисленными попытками разрешить проблему электродвигателя при помощи электрохимического генератора. Никому в голову не приходило, что наука уже указала путь, по которому пойдет развитие электротехники. И это тогда, когда электромагнитный генератор был уже предметом самого внимательного изучения со стороны наиболее крупных ученых. Более того, в 1834 г. Эмиль Христиан Ленц уже открыл принцип обратимости. Но на это не было своевременно обращено внимание. Не учел этого и Якоби, который вместе с Ленцем работал над исследованием электромагнитного генератора.

Отказаться от электрохимического генератора означало вернуться к паровой машине, так как электромагнитный генератор основан на принципе превращения механической энергии в электрическую. Казалось, что теряется весь смысл электродвигателя. Раз необходимо прибегать к паровой машине, то проще всего применять ее в качестве привода, а не в качестве первичного двигателя, когда приходится вырабатываемую механическую энергию превратить электромагнитным генератором в электрическую, а затем электродвигателем опять в механическую.

Пионеров электродвигателя пленяла идея непосредственного превращения химической энергии в электрическую, — в случае паровой машины тепловая энергия ведь также генерируется за счет химической. И долгое время ток от электромагнитного генератора применялся только в случаях, когда электрическая энергия превращается в любой иной вид, только не в механическую, например, для гальванопластики, электрического освещения и т. п. В 70-х и даже в 80-х годах прошлого века электромагнитный генератор в литературе часто назывался машиной для освещения.

² В 30 и 40-х годах прошлого столетия электромагнитной машиной называли двигатель, питаемый током от гальванических батарей, а магнитноэлектрической машиной — электромагнитный генератор.

На электромагнитный генератор — двигатель — было обращено серьезное внимание только в 80-е годы, когда была установлена возможность передачи электрической энергии на большие расстояния.

Пример Якоби показывает, что и наиболее выдающиеся умы в истории науки и техники также отдают дань своей эпохе, оставаясь во власти господствующих представлений. Около десятка лет Якоби отдал своему электродвигателю. После горьких разочарований он одним из первых отказался от этой идеи.

Работа Якоби над двигателем сразу же обратила внимание широких научных кругов. В 1834 г. Александр Гумбольдт заинтересовался опытом Якоби и доложил об этом прусскому королю Фридриху Вильгельму III. Однако Пруссия первой половины XIX в. отнюдь не представляла собою благоприятной почвы для технических новшеств. Более того, Якоби было даже трудно найти соответствующее применение своей основной профессии — архитектуре. Как ни был он увлечен захватывающей идеей о повсеместном внедрении нового двигателя, отдавая ей всецело не было никакой возможности. Было ясно, что опыты с электродвигателем до тех пор, пока на практике не удастся доказать все предполагаемые его преимущества, должны оставаться его побочным занятием.

Терпя острую нужду в Пруссии, Якоби решил поехать в Россию. С этой страной Якоби связал свое будущее. Попал сразу он не в Петербург, где находилась Академия наук, насчитывавшая к тому времени более столетия своего существования и занимавшая уже видное место в научном мире, — а в провинциальный город Дерпт. Здесь, по рекомендации русского ученого К. М. Бера, он занял кафедру архитектуры в университете.

Годы пребывания в Дерпте совпадают с усиленной работой Якоби над проблемой практического применения электродвигателя. Цитированный выше трактат Якоби имеет под именем автора титул: профессор Дерптского университета.

Но и в Дерпте исследования в области электромагнетизма оставались его личным занятием. Главным, или, вернее, единственным его предметом в университете оставалась архитектура.

Ведя тщательные исследования в области практического применения электродвигателя, Якоби обнаружил два обстоятельства, связанные с применением электрохимического генератора, которые одно время казались ему «непреодолимыми препятствиями для эксплуатации этого двигателя и устранение которых представлялось делом только отдаленного будущего».

«Первым из этих обстоятельств, — писал Якоби, — является быстрое падение электродвигущей силы обыкновенной батареи и почти полная невозможность ее восстановления». Второе обстоятельство, которое, казалось, сводит на нет применение электрохимического генератора, заключалось в «двойственности процесса, происходящего в обыкновенном гальваническом элементе, а именно: цинк в элементе разлагается, с одной стороны, под действием чисто химического процесса и, с другой стороны, под действием замкнутой гальванической цепи. Несколько последнее полезно, так как питает магнитную машину, настолько первое, превосходя его часто во много раз и вызывая громадный расход цинка, не только пропадает без всякой пользы в отношении питания двигателя, но и, обычно, производит противоположный эффект».

В 30-х годах появились первые наиболее усовершенствованные гальванические элементы Даниэля, Грове и др. Казалось, что теперь не осталось серьезных препятствий к распространению электродвигателя, питаемого током от электрохимического генератора.

Исследования Якоби гальванической, или, как тогда часто говорили, «вольтаической» батареи относятся к началу 1837 г. Результаты, изложенные в письменной форме, он отоспал акад. Э. Х. Ленцу, который нашел их достойными опубликования в трудах Академии наук.

Якоби был настолько удовлетворен эффектом своей работы, что счел вопрос о применении своего двигателя в принципе решенным, и лабораторные опыты закончеными. Необходимо было перейти, как мы теперь сказали бы, к полузаводским испытаниям.

Якоби подсчитал, что для выполнения задуманного им плана потребуется лять лет, причем ежегодно придется тратить не меньше чем 10 000 руб.

Его собственный доход не превышал 3000 руб. в год. Надо было искать базу, которая могла бы обеспечить не-

обходимое «вспомоществование». И он обратился к С. С. Уварову, который при Николае I был министром просвещения и президентом Академии наук.

Этого «покровителя наук» Пушкин в своей известной сатире «На выздоровление Лукулла» характеризует как карьериста и мелкого вора («Жену обсчитывать не буду и воровать уже забуду казенные дрова»).

Письмо Якоби к Уварову, опубликованное лишь недавно (в 1934 г.), является весьма выразительным документом, характеризующим те условия, в которых жил и работал его автор. Полное обычных для того времени рабочих и льстивых выражений, оно тем не менее не скрывает «материальных затруднений», которые приходилось испытывать дерптскому профессору. «Когда я, следя почетному приглашению, переходил в эдешний университет, я не думал о тех обстоятельствах, в которые я буду временно поставлен». Но упоминание о скучости средств на научную работу стоит лишь в конце. Главная же задача автора — вызвать благосклонность министра — заключена в других словах.

К концу своего весьма длинного послания он прибегает наилучше веский аргумент: он хочет воздействовать на Уварова, а через него и на самого императора образом Невы, «которая раньше Темзы или Тибра покроется судами с магнитными двигателями».

Не случайно Якоби указывает на применение двигателя именно на водном транспорте. Суда с новым двигателем действительно представлялись исключительно важным моментом, когда паровая машина, завоевавшая водный транспорт, у всех на глазах превращала морской флот в еще более грозную военную силу.

Этим можно объяснить то, что предложение Якоби встретило поддержку царского правительства.

Между прочим Уваров в своем докладе Николаю I по поводу предложения Якоби писал, что Якоби «предупредил все эти опыты (в области практического применения электромагнетизма) соответственными наблюдениями и опытами первым обратил внимание ученого совета на эту отрасль физико-химических наук».

Однако Якоби никогда не претендовал на приоритет в этом вопросе, как это он подчеркивает в своем трактате «О применении электромагнетизма для приведения в движение машин».

Якоби считал, что речь может идти только о «заслуге практического использования новой силы для нужд промышленности и жизни» и что «заслуга выпадает на долю того, кто лучше поймет механические и физические особенности нового двигателя».

В связи с докладом Уварова было отдано распоряжение создать наиболее авторитетную комиссию, возложив на нее обязанность всесторонне изучить и разработать предложение Якоби, и ассигновано на изыскания 50 000 руб. Деятельность комиссии должна была выразиться прежде всего в исследовании практических возможностей применения электродвигателя в судоходстве. Во главе комиссии был назначен адмирал И. Ф. Круzenштерн, а членами ее: неизменный секретарь Академии наук П. И. Фусс, академик Э. Х. Ленц, русский математик М. В. Остроградский, А. Я. Купфер — минералог и физик, основатель магнитной обсерватории Академии наук, П. Н. Шиллинг — знаменитый изобретатель электромагнитного телеграфа. В комиссию были еще введены «корпуса горных инженеров, полковник Соболевский и один корабельный инженер, по назначению главного морского штаба».

Комиссии было вменено в обязанность безотлагательно приступить к работе. Было предписано, чтобы немедленно «сей комитет по предварительному рассмотрению наблюдений и планов профессора Якоби составил полный проект о производении предполагаемых опытов с применением сего нового рычага к ботику соразмерной величины».

Не прошло и десяти дней и комиссия уже выполнила свое первое задание. 9 июня 1837 г. на первом заседании члены комиссии «рассматривали» устроенную г. профессором Якоби модель машины, приводимой в движение посредством электромагнитной силы и удостоверились в успешном ее действии». Выслушав сообщение Б. С. Якоби о выгодах, которыми такие машины отличаются перед прочими, комиссия пришла к твердому заключению, что «ныне наступила пора к употреблению всех усилий для практического приспособления сего нового двигателя».

Комиссия, имея в виду распоряжение о применении двигателя к движению ботика, «заботилась начертанием ряда предварительных опытов для скорейшего достижения

его практического результата с устранением на первый случай всех могущих встретиться при том любопытных теоретических задач и соображений».

Раньше чем перейти к изложению сметных соображений, комиссия вносит в докладную записку следующую весьма характерную фразу: «Это казалось тем более необходимым, что с некоторого времени внимание во всех просвещенных государствах устремлено на приспособление электромагнитной силы к судоходству и что пребывание г. Яакоби в отечестве нашем дает нам надежду предупредить в этом отношении успехи иностранных физиков».

Оставалось невыясненным положение главного члена комиссии Б. С. Яакоби. Комиссия сочла также необходимым, чтобы опыты профессора Яакоби производились в Петербурге, под личным его наблюдением.

28 августа Яакоби приехал с семейством в Петербург, а 1 сентября безотлагательно приступил к работе.

В лице Ленца Яакоби нашел весьма авторитетного и исключительно одаренного сотрудника по части разработки возникавших теоретических вопросов. Как писала комиссия в первом своем большом отчете после годичной работы: «ученою стороною предмета, которая должна послужить впредь основанием всякому практическому приспособлению нового движения, занимались со взаимною ревностью г. профессор Яакоби и г. академик Ленц».

По части техники Яакоби мог пользоваться и пользовался указаниями другого члена комиссии — корпуса корабельных инженеров капитана С. А. Бурачка.

Условия, в которых велась работа над приспособлением электродвигателя к движению судов, были по тем временам весьма удовлетворительны. Кроме аппаратуры необходимой для опытов, было приобретено огромное оборудование, давшее возможность создать большую мастерскую, которая впоследствии позволила избежать многих заказов на стороне.

Недаром мастерская Яакоби приводила в удивление не-посвященных посетителей. В одной петербургской газете ее описывали так: «квартира г. Яакоби на Васильевском Острове, в доме Парланда № 30, на берегу Невы, между 16 и 17 линиями — это точно жилище волшебника. Везде стоят машины и аппараты самого простого устройства и по прикосновению его волшебного жезла вдруг все машины двигаются, мечут искры, плавят металлы. От прикосновения другим концом жезла все мертвает. Любопытно и поучительно. В средние века фанатики сожгли бы Яакоби, а поэты и сказочники выдумали бы о нем легенду, как о Фаусте...»

Как внимательному технику Яакоби с самого начала было ясно, что судно должно иметь наибольшую полезную площадь. Таким образом возникло дополнительное затруднение добиться того, чтобы все установки не занимали слишком много места. И он начал с упрощения генератора, которое осуществлялось по двум направлениям: уменьшение объема и уменьшение веса. Очень скоро Яакоби удалось достигнуть весьма благоприятных результатов.

Яакоби, никогда не теряющий практической трезвости, часто был убежден, что он очень близок к окончательным результатам. Такое убеждение внушалось не отдельными, нередко очень яркими, успехами, а глубокой верой, что вновь открытая человеческому знанию сила природы будет, наконец, завоевана и что победа эта не за горами.

После годичной работы над электродвигателем, Яакоби удалось привести в движение на Неве восьмивеселый катер, снабженный «гребными колесами по образцу тех, которые употребляются на пароходах».

Первый опыт подобного плавания был произведен 13 сентября 1838 г. и впоследствии неоднократно повторялся. Опыт оказался весьма успешным. Он даже в известной мере превзошел ожидания.

«В противность первоначальному плану, — говорится в отчете комиссии, — по которому предположено было производить опыты на тихой воде, удалось совершать плавание на самой Неве и даже против течения», и это несмотря на то, что «невозможно было разделить на судне тяжесть равномерно, а, напротив, должно было ограничиться почти одною только передовою частью судна, которая в сравнение с его величиною погружалась в воду несоразмерно глубоко, а именно $2\frac{1}{2}$ фута».

Далее в отчете отмечается, что удалось получить благоприятные результаты в смысле площади, занимаемой двигателем. Катер имел в длину 25 футов, а в ширину $7\frac{1}{2}$. Двигатель имел в длину $2\frac{1}{2}$ фута, а в ширину $1\frac{1}{8}$ ф.

Генератор удалось разместить так, что он не занимал почти никакой полезной площади: «батареи, состоявшие из 320 пластинок, могли быть удобно устроены вдоль боковых стен, так что часто на судне без стеснения помещалось до 12 человек».

Судно развивало предельную скорость около 2,5 км в час. Средняя скорость была немного меньше. «Лодка, — говорится в отчете, — проехала 7 вёрст сразу по Неве и по каналам и совершила сей путь в течение 3 часов».

Переходя к выводам, комиссия подчеркивает, что «разрешили главный заданный ей вопрос касательно возможности употребления электромагнетизма как двигательной силы тем, что при неблагоприятных, впрочем, обстоятельствах, удалось привести в движение этою силою двойной значительной величины восьмивеселый бот».

Первый опыт уже обнаружил ряд технических недостатков устройства Яакоби. Бросалось в глаза то, что «конструкция коммутатора и изолирование проволок не соответствует сильному гальваническому току нескольких сот пар пластинок». Далее, качка судна вызывала дополнительные «неудобства». И «в этом отношении, — писала комиссия, — остается еще сделать всего более». Были и еще весьма важные затруднения. В докладе комиссии они изложены следующим образом:

«Построение, манипуляция и упрощение батареи составляет самую существенную часть в приложении на практике электромагнитной двигательной силы. Постоянное действие употребляемых комиссией столбов основывается на том, что в каждом элементе между цинковою и медною пластинками находится не одна только жидкость, как это обыкновенно бывает, но две жидкости, разделенные одна от другой телом, пропускающим их весьма медленно через свои скважины: именно, на стороне цинка находится слабая серная кислота, а на стороне меди — медный купорос. Теперь должны быть приняты в соображение два обстоятельства:

1. Какой дать вид и из какого вещества устроить перегородки, разделяющие обе жидкости. Это уже был первый шаг к усовершенствованию машины, когда вместо прежде употреблявшихся перегородок взяли слабо пережженную глину. Однако время было слишком коротко, чтобы можно было произвести надлежащие опыты над свойствами этих глиняных перегородок и образом их приготовления...».

«2. Другое обстоятельство — манипуляция батареи; они состоят ныне из весьма многих отдельных частей, из которых каждая требует некоторого внимания, особенно затруднительного при заряжении и разряжении, а равно при устройстве целой батареи, это чисто технический предмет, и здесь, вероятно, сбудется столь обыкновенное замечание в технике, что удобное и приличнейшее устройство легче придумать в большом, нежели в малом виде. Что, впрочем, батареи можно устроить гораздо проще, в этом есть самая основательная надежда, а именно из сделанных г. Яакоби вместе с г. академиком Ленцом исследований оказалось, что сила электромагнитов зависит единственно от поверхности цинка, так что например на 100 квадратных футов цинка совершенно одно и то же, будет ли составлена из них только одна пара пластинок в 100 квадратных футов поверхности или 100 пар пластинок в 1 квадратный фут каждая; только смотря по этому, нужно будет обвить железо проволоками различной толщины. Оправдаются ли эти же отношения и во время самого действия машины, этого комиссия еще не могла узнать решительно, и хотя оно весьма вероятно, но должно быть предоставлено дальнейшим опытам и тщательному соображению всех посторонних обстоятельств. Однако уже само собою ясно, какие выгоды должны произойти от того на практике, когда вместо 400 элементов нужно будет обращать внимание на 10 или 12. Заряжение и разряжение батареи будет совершаться тогда в несколько минут и занимаемое батареей пространство значительно уменьшится. Первоначально предложенная комиссией задача была преимущественно устремлена на производительную силу машины, об издержках на содержание ее покамест еще не было речи. Но нет сомнения, что эта доселе упущенная из виду сторона примет решительный перевес, когда приступлено будет к устройству судна в большом виде».

Теоретически комиссия была, несомненно, права. Первоначальные издержки отнюдь не характеризуют фактическую стоимость работы той или иной машины.

Но цинк представляет собой во много раз более дорогое «толчivo», чем уголь, и в этом заключается главная причина неуспеха электродвигателя, питаемого током от

гальванических батарей. Этот дефект был неустраним, как неустраним он и в наши дни. Таким образом все дело было в генераторе. Заблуждение комиссии, как и всех ее современников, состояло в том, что именно это обстоятельство упускалось из виду.

К сожалению, это самое важное обстоятельство, выяснилось далеко не сразу, и все внимание было обращено на усовершенствование конструкции двигателя. За год работы Якоби добился весьма важных результатов. В 1839 г. батарея из 64 элементов в 36 кв. дюймов поверхности допускала на том же судне развивать в два раза большую скорость, чем батарея из 320 пар пластин той же поверхности в 1838 г.

Новый выпуск еще больше окрылил Якоби новыми надеждами.

В письме к Фарадею — оно относится к июню 1839 г. — он писал, что «основное затруднение больше не существует». И тогда еще Якоби полагал, что главный недостаток его двигателя заключается в «трудности обслуживания батареи», а не в дорогоизнене его применения. В том же письме он выражает надежду, что «не больше, чем через год удастся построить электромагнитное судно с машинной мощностью от 40 до 50 л. с.». Иными словами, новое техническое улучшение укрепило его в мысли, что он уже совсем близок к полному разрешению задачи.

Дальнейшие опыты Якоби надежд этих не оправдали. В 1839 г. мощность улучшенной конструкции машины равнялась от $\frac{1}{4}$ до 1 л. с. Однако второе испытание двигателя Якоби вызвало еще большую уверенность в практической возможности «электрохода». Подобные настроения отражены в печати того времени, «Северная пчела» — единственная большая петербургская газета, если не считать «С. Петербургских Ведомостей», в своем отчете об испытаниях 2 сентября 1839 г. рассматривает их как первый шаг в деле применения электромагнетизма на практике.

«2 сентября человек до шестидесяти ученых, литераторов и любителей наук (в том числе высших сановников) собрались на Петровском Острове на даче полковника горных инженеров П. Г. Соболевского, чтобы быть свидетелями новых опытов над применением электромагнетической силы к судоходству. Катер с двенадцатью человеками, движимый электромагнитескою силою (в $\frac{1}{4}$ силы лошади), ходил несколько часов против течения при сильном противном ветре. Этот опыт в области наук тоже, что открытие письма. Нет еще эпопеи, но мысль уже выражена. Что бы ни было впоследствии, важный шаг сделан, и России принадлежит слава первого применения теории к практике».

Опыты Якоби обратили на себя внимание не только в

русской печати. Вести об его исследованиях проникли в европейскую прессу и получили всемирную известность.

Каждое новое испытание обнаруживало новые технические недостатки, и неизменно Якоби сравнительно легко с ними справлялся. Однако было ясно, что все труды и старания не приближают к практическим пригодному двигателю. Комиссия все больше и больше укреплялась в мнении, что серьезные сдвиги возможны будут лишь, «ежели будут сделаны открытия, могущие послужить к усовершенствованию приложения электромагнетизма».

Одно время Якоби возлагал много надежд на применение в элементах платиновых пластинок вместо медных. «Через замену медных пластинок платиновыми», — читаем мы в одном донесении комиссии, — при равном объеме батареи, сила ее может увеличиться до 16 раз.

Применение на практике предложения Якоби действительно увенчалось успехом: преимущества были несомненны. Получалась возможность в значительной степени уменьшить объем всего сооружения. Но многочисленные улучшения, каждое из которых само по себе отличалось несомненной выгодой, не в состоянии были одолеть неодолимое — экономическую неэффективность. Становилось все более ясно, что «корень зла» кроется в природе электрохимического генератора. Как писал Якоби несколько лет спустя, «ни в каком случае не удастся извлечь из фунта цинка большей выгоды, если только, как было предлагаю, просто увеличить размеры машины той же системы».

Но раньше, чем осознали это с достаточной ясностью, было потрачено немало труда, не пропавшего, впрочем, даром. В одном из отчетов комиссии подчеркивается, что она «поставляет себе в удовольствие засвидетельствовать, что исследования их [Якоби и Ленца] более и существенное послужили к объяснению количественных отношений электромагнетизма, нежели другие какие-либо опыты новейшего времени». Кроме чисто теоретических вопросов, работы над электродвигателем привели и к новым техническим успехам, открывавшим благодарное поприще для практического применения электрической энергии.

Важнейшим достижением в этом отношении было изобретение гальванопластики. В свете этих плодотворных исследований изыскания по части превращения электрической энергии в механическую постепенно отодвинулись на задний план.

Начиная с 1841 г., комиссия прекращает свою деятельность.

В 1843 г. последовало распоряжение о сдаче всего делопроизводства в архив Академии наук³, а приборов и всей аппаратуры — в физический кабинет Академии.

* Документы эти хранятся там и поныне.

О повышении генераторного напряжения на электростанциях

По поводу статьи Е. Зеликsona „НЕОБХОДИМО ПОВЫСИТЬ ГЕНЕРАТОРНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ“ („Электричество“ № 9—10, 1937)

Тов. Зеликсон поднял весьма интересный вопрос о повышении генераторного напряжения, доказывая целесообразность этого рядом положений, иллюстрированных практическими примерами. В конце концов он приходит к заключению, что для крупных городских центров и промышленных комбинатов переход на генераторы высокого напряжения экономически и технически оправдан.

Однако приведенные им примеры неудачны.

Возьмем хотя бы пример с теплоэлектроцентралью. Для доказательства того, что генератор высокого напряжения, имеющий повышенный реактанц рассеяния, является единственным обеспечением возможности любого распределения нагрузки между генераторами станции (при генераторе 10,5 kV автор получил разность напряжений между двумя секциями в 14,8%, что, конечно, недопустимо), автор задался таким режимом работы электростанции, который вообще немыслим для правильно организованного энергохозяйства. В самом деле — можно ли теперь, когда борьба за улучшение $\cos \varphi$ у потребителей уже дала и даст в дальнейшем весьма ощутительные результаты, когда все более и более внедряются синхронные моторы, фазокомпенсаторы, статические конденсаторы, когда генераторы рассчитываются на $\cos \varphi = 0,9$ и поддержание такого $\cos \varphi$ на шинах станции уже сейчас является вполне возможным, — можно ли считать удовлетворительным такой режим работы, при котором $\cos \varphi$ на шинах станции не превышает 0,7 и компенсация этого недопустимо низкого коэффициента мощности возлагается по чому-то на генератор станции, связанный с остальными генераторами через два реактора? Конечно, при таких условиях применение реакторов становится невозможным. Но выходом из этого положения является не использование высоковольтного генератора в качестве фазокомпенсатора, как это намечает автор. Такой способ заведомо невыгоден и нерационален. Надо улучшить $\cos \varphi$ сети, и тогда при любом напряжении генераторов трудности с использованием агрегатов исчезнут.

Автор определил, что при переходе Магнитогорского комбината на 35 kV размер капитальных вложений уменьшается на 2,1 млн. руб. По табл. 2, приведенной автором, эта экономия составляет только 1,7 млн. руб. Очевидно, автор допустил в тексте описку. Но в подсчетах этой таблицы имеются значительные пропуски и неточности.

Так например:

а) Пропущено удорожание ячеек генераторов, соединительных масляников, собственных нужд, повышительных трансформаторов, реакторов в схеме Скотта и т. п., связанное с переходом на 35 kV.

Если подсчитать число этих ячеек по схеме, приведенной автором на рис. 1, получаем:

Ячейки генераторов	7 шт.
» повышительных трансформаторов .	2 »
» собственных нужд	6 »
» соединительных масляников . .	8 »
» схемы Скотта	6 »
Всего	29 шт.

Считая по данным автора удорожание ячейки равным 27,5 тыс. руб., получаем увеличение затрат в сумме 800 тыс. руб.

Удорожание трансформаторов на станции в связи с повышением напряжения одной обмотки с 10,5 kV на 35 kV (всего 140 тыс. kVA по 0,7 руб.) составит еще 100 тыс. руб. Удорожание стоимости реакторов — ориентировочно 100 тыс. руб.

Таким образом затраты на электростанцию увеличатся на 1 млн. руб.

б) Пропущено удорожание стоимости цеховых подстанций в связи с их переводом на 35 kV. Из-за отсутствия необходимых данных мы можем подойти к определению¹ этой

цифры лишь грубо приближенно на основании некоторых данных, приведенных в статье автора.

Наименование	10,5 kV	35 kV	Удорожан. тыс. руб.
Число цеховых подстанций	10	10	—
Число ячеек ввода	24	12	120
связи	4	10	250
трансформаторов	18	26	1100
Удорожание трансформаторов 100 тыс. kVA по 0,7 р. . .	—	—	70
Итого		—	1540 тыс. руб.

Всего к стоимости, подсчитанной автором для варианта 35 kV, надо добавить 2,540 млн. руб., и 35-kV вариант становится дороже варианта 10,5 kVA почти на 750 тыс. руб.

в) Всюду мы пользовались единичными расценками автора, не критикуя их. Между тем эти расценки внушают большие сомнения. Так например, преуменьшенной является стоимость ячейки 35 kV в закрытом здании².

Если учесть, что в цену ячейки входит стоимость здания, включая и щит управления, помещение аккумуляторной батареи и все 35-kV оборудование с защитой и измерительными приборами, то станет ясным, что стоимость ячейки в 60 тыс. руб. слишком мала. Еще более непонятной является принятая автором стоимость прокладки кабеля, на которой автор получил наибольшую экономию в выдвигаемом им варианте. Автор принимает стоимость прокладки 1 т кабеля для 10,5 kV — 18,2 руб., а для 35 kV — около 17 руб. В общем случае стоимость прокладки возрастает с напряжением. В данном же случае монтаж 35-kV кабеля должен быть значительно дороже, потому что кабель 10,5 kV прокладывается в блоках по 3—4 шт., а кабель 35 kV идет по-всюду по разным трассам, что удорожает земляные работы.

Далее, кабель 35 kV имеет сечение 240 mm², а как кабель 10,5 kV — 150—185 mm²: это существенно удорожает монтаж. Поэтому значительная экономия, полученная автором по позиции „стоимость прокладки кабеля“, должна сильно уменьшиться, что еще более увеличит невыгодность рекомендуемого варианта.

Если добавить сюда увеличение стоимости самих генераторов и их присоединение к шинам, удорожание ремонтов и эксплуатации (большие объемы масла, необходимость квалифицированного обслуживания и т. п.), то станет очевидным, что своим примером автор доказал как раз противоположное тому, что он хотел.

Правда, переход на высокое напряжение связан с экономией меди. Автор определяет ее в 250 т. Из этого количества необходимо исключить вес меди в добавочных трансформаторах общей мощностью в 80 тыс. kVA, и расход ее на удлинение контрольно-измерительной проводки, связанный с потребностью в центральных щитах управления на каждой цеховой подстанции, наконец, должен быть исключен весьма значительный вес меди, который должен быть израсходован на усиление кабельной сети 3,15 kV (при первичном напряжении 35 kV сеть 3,15 kV должна пропустить на 80 тыс. kVA больше, чем при первичных 10,5 kV).

Все эти исключения значительно уменьшают подсчитанную автором экономию меди.

Следует еще отметить, что весовая экономия меди при значительных перерасходах в капитальныхложениях и удорожании стоимости эксплуатации не может рассматриваться

¹ Стоимость 10,5-kV ячеек на цеховых подстанциях принята в 25 тыс. руб. Число ячеек трансформаторов принято, исходя из мощности одной единицы в 5600 kVA, равным 18 шт. для 10,5 и 26 шт. для 35 kVA (добавлено 8 трансформаторов по 10 тыс. kVA).

² Об открытой подстанции в данном случае не может быть и речи, так как нельзя ни по условиям места ни с точки зрения загрязнения подстанции пылью, водой и т. д. разместить 10 открытых 35-kV подстанций на территории промышленного комбината.

как основание для выбора варианта. Ощущимость этого фактора прямо зависит от снабжения цветными металлами. Поэтому и в нашем случае, если рассматривать вопрос в перспективном разрезе, т. е. с учетом того, что положение с цветными металлами ежегодно улучшается, то небольшая экономия меди не может оказаться на выборе варианта.

Резюмируем свои замечания в том же порядке, в каком автор подвел итог своим выводам:

1. Простота системы при переходе на 35 кВ в известной мере достигается в результате уменьшения числа ячеек и длины кабелей. Но появляется более сложная аппаратура, усложняющая эксплуатацию системы.

В надежности системы никак не выиграет. Хотя снижение числа аппаратов и длины кабелей увеличивает надежность, вместе с тем нельзя забывать того, что запас прочности изоляции снижается с повышением напряжения. Весьма опасно присоединение генератора непосредственно к наиболее грозопоражаемой сети. До появления надежных приборов защиты от перенапряжений вращающихся машин это обстоятельство будет всегда вносить элемент ненадежности.

2. Возможность свободного маневрирования установленными мощностями крупных электростанций не является чем-либо присущим только генераторам с напряжением не ниже 35 кВ. Такая возможность может и должна быть обеспечена правильной схемой и нормальной эксплуатацией сети.

Пример, взятый автором для доказательства того, что только 35-кВ генератор может обеспечить такое маневрирование, является нежизненным и поэтому неудачным.

3. В приведенном автором примере сокращение капитальных затрат не достигается.

4. В приведенном автором примере нет значительной экономии в электрических потерях.

5. Экономия в меди имеет место, так же как и при всяком повышении напряжения. В этом нет ничего специфически связанного с применением генераторов высокого напряжения. В примерах, приведенных автором, эту экономию нельзя назвать "очень большой". Указание, что в случае перевода городских кабельных сетей на высокое напряжение получится значительная экономия меди, является бесспорным. Однако, как известно, выбор напряжения для городских сетей производится не только по условию наименьшей затраты меди.

Автору своими примерами не удалось доказать целесообразность применения генераторного напряжения 35 кВ, но значит ли это, что повышение генераторного напряжения нецелесообразно вообще?

Нет, конечно, такой вывод сделать нельзя. Генераторное напряжение 35 кВ будет экономичным для станции, не имеющей потребителей генераторного напряжения 8,15—10,5 кВ и питающей районную сеть 115 и 35 кВ. В этом случае можно без добавочных трансформаций питать сеть 35 кВ, что упростит схему, облегчит регулировку напряжения в сети 35 кВ и уменьшит капиталовложения. Генераторное напряжение 35 кВ может найти себе применение, например, кабельной сети Москвы, после ее перевода на 35 кВ.

Неправильно объясняет автор распространение 35 кВ генераторов в Англии и отказ от их применения в Америке. Распространение таких генераторов в Англии, скорее всего, можно объяснить тем, что "избранные станции" (selected station), присоединенные к высоковольтной сети (grid), питают разветвленные сети 35 кВ местного значения.

Известно, что английская "grid" не предусмотрена для передачи больших мощностей на далекие расстояния.

Огромная часть энергии в Англии отпускается непосредственно с шин электростанций в местные распределительные сети или в местные линии электропередач. В этом случае генераторное напряжение 35 кВ себя полностью оправдывает, так как преобладающая часть энергии не подвергается трансформации.

В Америке преобладает дальнее электроснабжение и поэтому там нет необходимости в наличии генераторного напряжения 35 кВ. Тенденции к повышению генераторного напряжения есть и у американцев, но только для больших генераторов и обусловлены желанием уменьшить вес меди в обмотке генератора. Однако они в этой тенденции не идут выше 22 кВ. Очевидно, что никак нельзя объяснить отсутствие генераторов 35 кВ в Америке косностью американцев или нежеланием приобретать иностранные патенты. Решающим здесь являются совсем другие условия эксплуатации энергосистем, чем в Англии.

В громадном разнообразии широко развитой советской энергетики, несомненно, найдутся системы, в которых высокое напряжение генераторов будет вполне целесообразно. Поэтому вопросом о повышении напряжения генераторов заниматься обязательно необходимо.

В. Л. Гуревич

К СТАТЬЕ ОБ АМЕРИКАНСКОМ МЕТОДЕ КОММУТАЦИИ

В № 5 журнала за текущий год напечатана в порядке обсуждения статья М. Д. Залышкина¹. Я приветствую предложение автора применять американский метод коммутации, однако статья содержит принципиально неверное утверждение:

Сравнивая схему кольца и схему звезды, автор приходит к заключению, что при схеме звезды ограничена возможность выпуска свободной мощности в систему вследствие больших колебаний напряжения, чем в схеме кольца. Этот вывод построен на недоразумении.

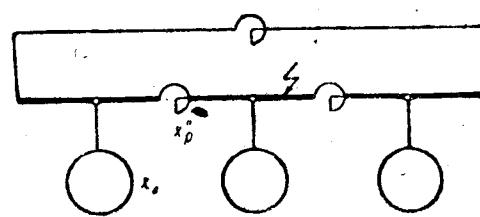
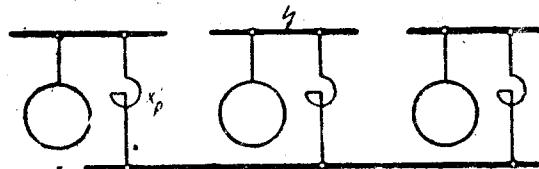
Чтобы сравнить две схемы по одному какому-нибудь свойству, например эксплуатационной гибкости (способности удержать качество энергии при различных режимах), необходимо выбрать условия, при которых другие свойства схем уравниваются. Этого не сделал М. Д. Залышкин. Для обеих схем взяты секционные реакторы с реактанцем в 10%; для схемы звезды на пропускную способность 3000 А, а для схемы кольца — 2000 А. При таких условиях схемы оказываются неравноценными по способности ограничивать токи к. з. Если секционные реакторы выбрать на такой реактанец, что обе схемы будут иметь одинаковые токи к. з. на сборных шинах, то на стороне схемы звезды окажется преимущество возможности передачи мощности с одной секции на другую при меньших колебаниях напряжения, иначе говоря эта схема обладает большей эксплуатационной гибкостью. Это нетрудно доказать для простого случая трех секций и отсутствия связи с системой. Результирующий реактанец станции при к. з. на секции может быть определен из следующих выражений:

для схемы звезды —

$$\frac{1}{x_{\text{рез}}} = \frac{1}{x_2 + x_p'} + \frac{1}{x_2};$$

для схемы кольца

$$\frac{1}{x_{\text{рез}}} = \frac{1}{x_2 + x_p''} + \frac{1}{x_2};$$



в условия равенства результирующих реактанцев находятся:

$$3x'_p = x_p''.$$

Механическое сопротивление реактанца реактора в схеме колца должно быть в три раза больше, чем в схеме звезды. Изменение напряжения при сверхточках равных мощностей одной секции на другую в схеме колца оказывается в три раза больше, чем в схеме звезды. Ошибка автора

заключается в том, что в схеме звезды взят преувеличенный большой реактант секционных реакторов.

*Схема звезды более симметрична, чем схема колца. В схеме колца различные секции отделены друг от друга различными реактанцами, в схеме звезды все секции находятся друг по отношению к другу в равных условиях. Поэтому схема звезды при любом количестве секций может обеспечить большую эксплуатационную гибкость.

Г. С. Борчанинов

ЕФЕРАТЫ

ANS, Fr. Новые способы установки мачт линий передач на слабых грунтах. ETZ, 1 April 1937, N. 13, S. 340-342, Bild 6

Основаниям для мачт линий передач, устанавливающихся на болотистых, торфянистых и прочих слабых грунтах, предъявляются следующие требования: а) прочность применяемых материалов и тяжелость их по отношению к почвенным кислотам, б) легкость доставки этих материалов на место установки мачт, в) отсутствие болтовых соединений ниже уровня земли; г) легкость установки самих мачт на основаниях.

Исходя из этого, автор предлагает отказаться от устройства опор на таких почвах от деревянных и железобетонных свай и заменить их новым типом полых или кессонов из нержавеющей стали специального

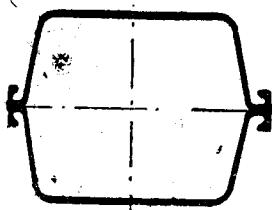


Рис. 1

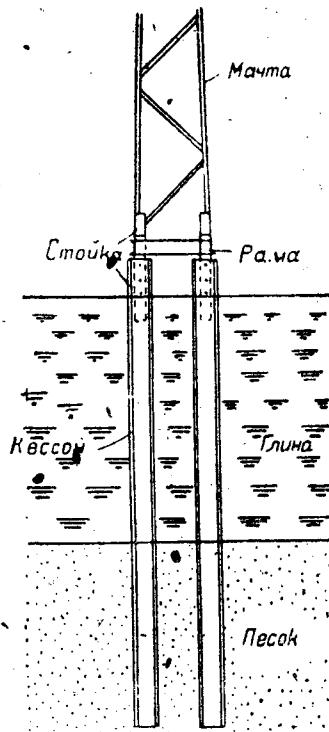


Рис. 2

профиля Larssen (рис. 1). В статье даются все основные величины для расчета таких оснований.

Общий вид основания мачты дается на рис. 2. Для заливки кессонов применяется специальный копер. Непосредственно в полости кессонов вставляются и затем прибываются и заливаются цементом стойки мачты.

Автор довольно подробно описывает способ устройства оснований и установки мачт, иллюстрируя это чертежами и фотографиями, и считает, что производительность труда при новом способе устройства опор возрастает на 30%.

Прочность рекомендуемых стальных свай очень велика; свыше 100 тонн на сжатие с почвы, как показали испытания, также превосходит предъявляемые требования.

Еще одно ценное свойство данного типа оснований подчеркивает автор. Это незначительное переходное сопротивление заземленной части мачты, а именно от 0,5 до 35 Ом в зависимости от рода почвы. Это свойство нового типа опор должно быть полностью использовано при устройстве защиты от грозовых разрядов.

Последовательный промежуток для разрядника¹. Из обзора французских патентов RGE, т. XLI, № 9, 27 февраля 1937 г., стр. 69D.

Каждый из элементов последовательного промежутка разрядника содержит между парой электродов изолирующее тело, снабженное отверстием, через которое проходит газ, вызывая задувание дуги.

На рис. 1 представлен схематический разрез вдоль оси промежутка — 1, 2 — электроды элементарного промежутка, укрепленные на металлической пластинке 3. Искровой промежуток регулируется для получения желаемого разрядного напряжения. В промежутке между электродами помещается изолирующее тело 4, снабженное каналом 5, ось которого совпадает с осью электродов. С обеих сторон этот канал переходит в расширяющееся сопло 6.

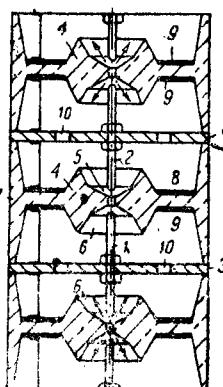


Рис. 1. Разрез по оси промежутка

Устройство поддерживается изолирующим цилиндром 7, связанным с телом 4 посредством кольцеобразной изолирующей пластины 8. Обе стороны кольцеобразной пластины 8 металлизированы, как показано на 9, для того, чтобы образовать конденсатор, улучшающий распределение напряжения.

При пробое промежутков загорается дуга. Давление, создаваемое дугой, гонит ионизированный газ из пространства между электродами. Газ энергично расширяется и проходит через отверстие 10. В результате разрыв дуги происходит очень быстро при первом переходе тока через нуль². Аппарат обладает большой разрывной мощностью.

Е. В. Калинин

Автоматическое пусковое сопротивление. Association Suisse des Electriciens Bulletin № 2, 1937, стр. 35

Для ограничения пускового тока электрических машин обычно применяют пусковые реостаты, при помощи которых в цепь якоря вводится сопротивление, выводимое постепенно по мере разгона машины и уменьшения пускового тока. Для автоматизации этого процесса фирмой Philips используются полупроводники, имеющие отрицательный температурный коэффициент, т. е. уменьшающие свое сопротивление с ростом температуры.

Стержень из смеси кремния со связующим керамическим веществом помещается в стеклянный баллон, заполненный инертным газом — аргоном. Концы, выведенные из

¹ Вероятно, пригоден для разрядников с последовательными сопротивлениями типа тиристоров и т. п. (Реф.).

² При этом, вероятно, хорошо перемешивается и охлаждается о металлические стены отверстия 10, что способствует десорбции воздуха (Реф.).

³ При переходе через нуль давление газов дуги равно нулю, и в искровой промежуток поступает относительно холодный газ из остального пространства, содействуя десорбции дуги (Реф.).

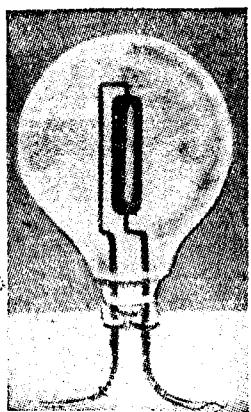


Рис. 1. Общий вид автоматического пускового сопротивления

На диаграмме (рис. 2) показаны примерные характеристики сопротивлений на разную силу тока (от 1 до 100 А) для напряжения 220 В. Проведенные испытания показали, что новые

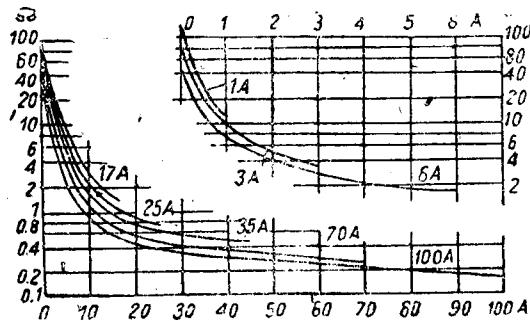


Рис. 2. Примерные характеристики сопротивлений на разную силу тока (от 1 до 100 А) для напряжения 220 В

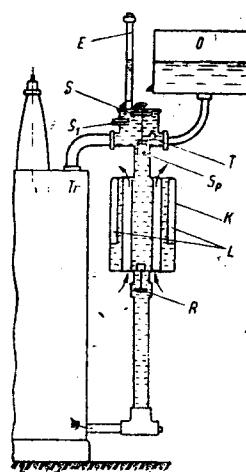
автоматические пусковые сопротивления могут выдержать до 10 000 ч непрерывной работы и до 100 000 включений.

А. А. Лебедев

Новая защита трансформаторов. ETZ, № 8, 1937, стр. 217

Для защиты трансформаторов от перегрузки, перегрева и утечки масла инж. Bendman разработана оригинальная система, основанная на динамическом действии циркулирующего масла.

Как видно из рисунка, часть трансформаторного масла циркулирует по специальной трубе, вынесенной за пределы трансформатора. Благодаря искусенному охлаждению (при помощи охладителя *K*) масло во внешнем столбе имеет усиленную циркуляцию, скорость которой зависит от температуры масла внутри трансформатора *T₁*. При повышении температуры масла сверх допустимой скорость циркуляции увеличивается, и масло увлекает за собой поплавок *Sp*, который замыкает сигнальный контакт *S₁*. При бурном нагреве масла, вызванном внезапной большой перегрузкой или внутренним коротким замыканием, направление циркуляции может измениться. В этом случае автоматически закрывается обратный клапан *R*, вследствие чего возникает ударное действие верхнего столба масла на поплавок *Sp*. При этом замыкается контакт *S₁*, действующий на отключение трансформатора, и избыток масла в верхней части столба устремляется в воздушное пространство *L*.



баллона, аналогично пусковому реостату присоединяются в цель включаемой машины. В начальный момент сопротивление столба кремния очень велико, вследствие чего пусковой ток машины сильно ограничивается. В дальнейшем по мере роста температуры пусковое сопротивление падает, чем обеспечивается автоматический плавный запуск машины. После окончания пускового процесса сопротивление шунтируется и тем самым подготавливается к повторной работе. Такие автоматические пусковые сопротивления изготавливаются фирмой на номинальные токи от 1 до 100 А и на напряжение 125, 220 и 380 В. Соответствующим подбором параметров сопротивления (в смысле выделения и отдачи тепла) можно создать любую продолжительность пускового процесса.

Для сигнализации о медленном нагреве масла, продолжающемся несколько часов, предусмотрено термореле *T*, действующее на тот же сигнальный контакт *S₁*.

Уровень масла в трансформаторе контролируется поплавком *S*, который опускается при утечке масла ниже допустимого уровня и также действует на замыкание сигнального контакта.

А. А. Лебедев

Прибор для отыскания поврежденных изоляторов. Die El.-W. № 17, 15 Juni, 1937 г., стр. 11

Существующие в настоящее время методы отыскания поврежденных изоляторов в процессе эксплуатации чрезвычайно громоздки и затруднительны. Рабочий обязательно должен взбираться на каждую мачту и испытательной штангой прикасаться ко всем элементам гирлянды изоляторов. Из-за трудностей и неудобства подобных испытаний ревизия изоляторов производится обычно не чаще 1—2 раза в год. Фирмой AEG сейчас сконструирован и выпущен новый прибор, который позволяет

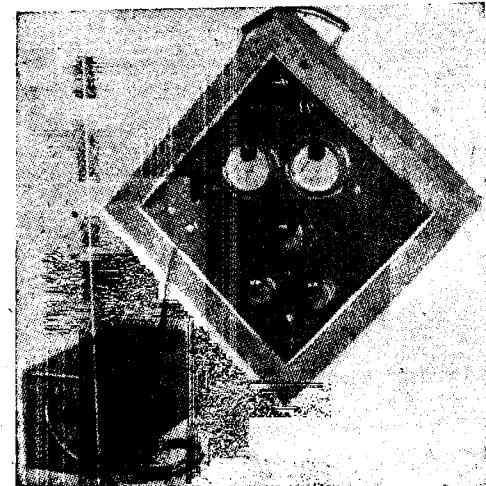


Рис. 1. Общий вид прибора для отыскания поврежденных изоляторов

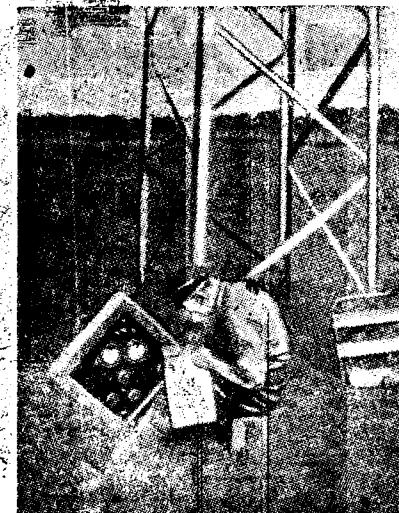


Рис. 2. Прибор для отыскания поврежденных изоляторов у подножия мачты во время работы

с уровня земли определить мачту, на которой имеются поврежденные изоляторы.

На рис. 1 показан общий вид прибора для отыскания поврежденных изоляторов.

Действие нового прибора основано на том, что у изоляторов, находящихся под рабочим напряжением, в местах даже самых незначительных трещин или повреждений образуются электрические разряды, излучающие высокочастотные колебания.

Прибор для отыскания повреждений изоляторов представляет собой ламповый приемник, в анодной цепи которого включен миллиамперметр.

Указанный приемник настроен на частоту 1600 кГц, так и опыты показали, что при такой настройке получается максимальная чувствительность к колебаниям, исходящим от поврежденных изоляторов. Во время испытаний прибор устанавливается у подножия мачты (рис. 2).

По отклонению стрелки миллиамперметра можно судить не только о наличии поврежденных изоляторов на данной мачте, но также и о характере этих повреждений.

Колебания, излучаемые изоляторами соседних мачт, не препятствуют испытанию, так как они не воспринимаются приемником (из-за очень сильного затухания). Определение поврежденного элемента в гирлянде производится при помощи испытательных штанг с искровым промежутком в 1 мм. Для этого приходится, конечно, подняться на мачту, однако это делается лишь тогда, когда по прибору видно, что на мачте имеются поврежденные изоляторы.

Шунтируя искровым промежутком отдельные элементы, изблюдают по прибору (оставленному внизу) отклонение миллиамперметра. Сопоставляя показания прибора при испытании данной гирлянды с показаниями другой здоровой (для которой отклонения имеют всегда определенную величину), можно легко найти поврежденный элемент.

Испытательный прибор и штанги приспособлены для легкого переноса их двумя людьми.

А. А. Лебедев

Электрификация дороги Лондон—Портсмут. Electric Rayway Traction, июнь 25, 1937, стр. 1226—1231

Электрификация дороги Лондон—Портсмут была выполнена в рекордный срок; в течение 20 мес. были построены 26 подстанций и оборудовано около 400 км путей.

Для снабжения энергией описываемого участка, помимо тонизитальных подстанций в Брайфлите и Портсмуте, была использована и железнодорожная электростанция, на которой 5000-кВт турбогенератор был заменен 12 500-кВт.

Трехфазный ток 50 Гц, 33 кВ от подстанций в Портсмуте и Брайфлите подводится к автоматическим тяговым подстанциям (управляемым из двух диспетчерских пунктов и оборудованным ртутными выпрямителями) и там преобразуется в постоянный ток 660 В. Кабели и высоковольтные управления проложены в деревянных лотках. 33-кВ силовой кабель, состоящий из трех одножильных освивцованных кабелей, в конце у входа в подстанции переходит в трехжильный, бронированный.

Кабели управления, 17- или 33-жильные с свинцовой изоляцией и бронированные, проложены вместе с силовыми.

Задача фидеров — дифференциальная.

Все 26 тяговых подстанций и 18 секционных постов управляются из двух пунктов, помещенных в Хавайте и Вокинге. Все подстанции идентичны и состоят из высоковольтной открытой части и выпрямительной установки с распределительным устройством постоянного тока, расположенной в закрытом помещении.

Высоковольтная часть, размещенная на бетонных конструкциях, нормально состоит из трех масляных выключателей разрывной мощности по 500 000 кВА, из которых два служат для секционирования и селективной защиты колыша, а один — для питания выпрямителя. Все изоляторы на открытой части запроектированы на рабочее напряжение в 44 кВ, а разъединители — на 350 А. Кроме того, имеются один однофазный 20-кВт трансформатор, питающий цепи сигнализации, освещения, управления включения и т. п., а также один трехфазный трансформатор 30 кВт, питающий вспомогательные цепи ртутного выпрямителя, освещение и нагрев подстанции. Внутри зданий, крайне простых и удобных, помещены металлические ртутные выпрямители продолжительной мощностью 2500 кВт, что соответствует 3790 А при 660 В. Наивысшая кратковременно допустимая нагрузка на ртутный выпрямитель — 12 000 А. Выпрямители оборудованы замкнутой циркуляционной системой охлаждения и полностью автоматизированы. Катод ртутного выпрямителя через 4000 А быстродействующий автомат обратного тока присоединен к шинам постоянного тока, откуда отходят фидеры, защищенные 2500-А быстродействующим автоматом. Отсасывающие фидера присоединены к ходовым рельсам и к

отрицательной шине (расположенной на подстанции вблизи главного трансформатора), откуда ток подводится к нейтрали трансформатора через реактор.

Система дальнего управления построена на селекторном принципе.

Питающий рельс (3-й рельс) стандартного сечения весом 49,6 кг/м укреплен на фарфоровых изоляторах. Рельсы длиною 18 м соединены между собой четырьмя медными накладками общим сечением 10,7 см². Ходовые рельсы имеют по два стыковых соединения; одно — защищенное и помещенное под накладкой и другое, приложенное к головкам рельсов, с суммарным сечением 2,15 см². Секционные посты расположены посередине между подстанциями и содержат группы быстродействующих автоматов в зависимости от количества путей.

М. Д. Трейвас

Передвижные подстанции. The E. J. April, 1937 г., стр. 160

В угольных рудниках с выработкой угля, как известно, перемещается и центр нагрузки. Во избежание прокладки более длинных кабельных фидеров постоянного тока для поддержания удовлетворительного напряжения в новой точке выемки угля было предложено использовать передвижные подстанции.

Вся подстанция монтируется на двух шахтных вагонетках. На одной помещается трехфазный 2300 В, 200 л. с. синхронный мотор, вращающий 150 кВт, 250 В генератор постоянного тока. На другой вагонетке размещаются все управление и защитное оборудование: защита против перевесности фаз, обрыва фаз, перегрузок со стороны переменного и постоянного тока, перегрева подшипников и др. Кроме того, аппаратура распределительного щита позволяет автоматически производить повторное включение фидеров переменного и постоянного тока в случае их включения из-за перегрузки или коротких замыканий.

Подстанция передвигается рудничным электровозом; колеса вагонеток подстанции спроектированы с достаточным вертикальным перемещением для защиты ее от схода с рельсов. Подстанция не нуждается в специальном фундаменте и вентиляционной системе. Необходимо лишь хорошо закрепить вагонетки на путях и подсоединить посредством контакта вилочного типа к штепсельной розетке подстанции к питающей системе переменного тока и фидерам постоянного тока.

Помимо поддержания удовлетворительного напряжения, подстанция служит и для улучшения коэффициента мощности. Так как врубовые машины приводятся в действие индукционными моторами 220 В, то средний $\cos \varphi$ был равен 0,86; без всякого добавления оборудования, улучшающего коэффициент мощности, юним лишь перевозбуждением синхронного мотора подстанции $\cos \varphi$ был поднят до 0,98. Так как мощность подстанции 150 кВт недостаточна, чтобы обслужить все механизмы участка рудника, где она установлена, подстанция работает параллельно с центральной силовой станцией, причем проблема распределения между ними нагрузки разрешена применением поля возбуждения генератора, дающего падающую характеристику напряжения. Напряжение подстанции при полной нагрузке составляет 250 В, в то время как центральная станция при всех нагрузках дает 275 В. Когда же нагрузка спадает, то напряжение подстанции поднимается тоже до 275 В. При малых нагрузках, когда напряжение высоко, возбуждение синхронного мотора достигает максимума, и, следовательно, опережающий ток достигает больших значений; при больших нагрузках возбуждение мотора понижается.

Описанные передвижные подстанции чрезвычайно удобны для обслуживания угольных рудников и заслуживают всяческого внимания.

М. Д. Трейвас

Применение этернита в электротехнике. Helios № 22 1937, стр. 652

Этернит (асбест) за последнее время получает все большее применение в различных областях техники — как строительный материал, нередко заменяющий металл (плиты, трубы и т. п.) — и, в частности, в электротехнике. В электротехнике он применяется для изготовления распределительных досок, деталей распределительных устройств и пр. Трубы из этернита широко применяются для прокладки кабелей — как силовых, так и кабелей связи, с целью защиты

кабелей от механических повреждений и от коррозионного воздействия блюжающих токов. Преимущества материала — его сравнительная дешевизна и низкий удельный вес (около 2). При малой толщине стенок (8–11 мм при диаметре в свету порядка 100 мм) обеспечивается высокая механическая прочность этернитовых труб. Гладкая поверхность этернитовых труб облегчает протаскивание через них кабелей при монтаже. Окраска труб изнутри не требуется; окраска может оказаться даже вредной, так как при коротких замыканиях с большим выделением тепла внутри окрашенной трубы возможно приплавление кабеля к трубе, что затруднило бы его вытаскивание.

Б. М. Тареев

Водяной реостат для испытания гидрогенераторов мощностью 82 500 кВА. El. W. Vol. 108, № 3, стр. 44 (1937)

Для испытания крупнейших в мире гидрогенераторов мощностью 82 500 кВА, 16 500 В, устанавливаемых на гидроэлектроцентрали Боулдер-Дэм (США), на основе строго теоретических расчетов сконструирован водяной реостат, предназначенный для длительного срока службы.

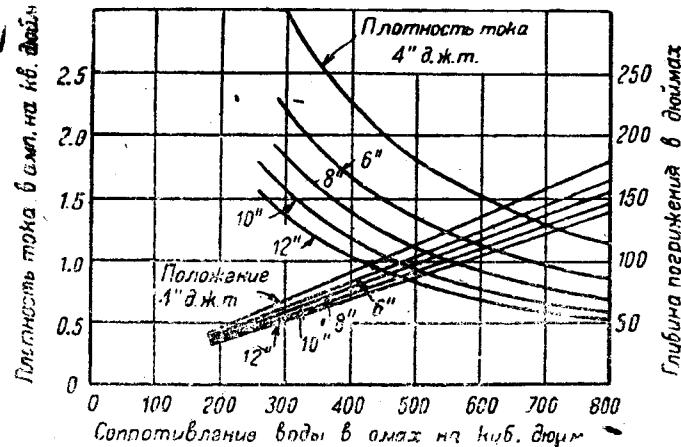


Рис. 1. Нагрузка — 82 500 кВт; напряжение — 16 500 В; расстояние между электродами — 240"; д. ж. т. — стандартный диаметр железных труб

Определения переменным током удельного сопротивления воды, взятой из нижнего бьефа гэц, указали на сезонные изменения этой величины в пределах от 350 до 550 ом на кубический дюйм.

Построенный водяной реостат состоит из трех 6-дюймовых медных труб длиною каждая 5,5 м, расположенных вертикально на взаимном расстоянии 6,1 м и укрепленных с помощью изолаторов на особой треугольной стальной раме. Реостат должен быть погружен в воду нижнего бьефа гэц не менее чем на 2,5 м для того, чтобы волнение, неизбежное в откры-

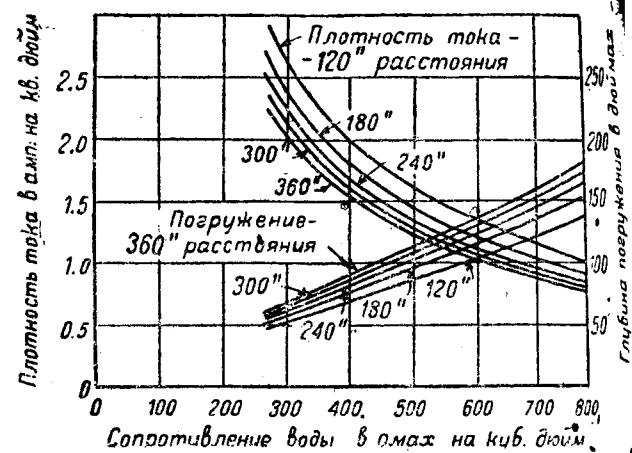


Рис. 2. Электроды — 6" д. ж. т.; нагрузка — 82 500 кВт; напряжение — 16 500 В

том водоеме, достаточно мало отражалось бы на величине эффективного сопротивления реостата. В рассматриваемом случае для заданной постоянной нагрузки сопротивление определялось по формуле:

$$R = \frac{\rho}{2,73l} \lg_{10} \frac{2D}{d},$$

где: R — сопротивление между электродом и нейтралью; ρ — удельное сопротивление воды (в омах на кубический дюйм);

l — глубина погружения электродов;

D — расстояние между центрами электродов; d — внешний диаметр электродов (размеры в дюймах).

Рекомендуется, чтобы плотность тока не превышала 2-3 ампера на квадратный дюйм, так как иначе работа реостата делается неустойчивой и опасной в отношении к з.

Связь между плотностью тока и другими величинами определялась уравнением:

$$D = \frac{d}{2} \lg_{10} -1 \frac{0,869 v}{\rho d},$$

где v — плотность тока A , на квадратный дюйм; v — напряжение относительно нейтрали.

Кривые на рис. 1 и 2 показывают, что при постоянной нагрузке реостата увеличение расстояния между электродами менее влияет на снижение плотности тока, нежели изменение диаметра электродов. Однако увеличение диаметра электродов (рис. 1) влечет за собой уменьшение погружения, в то время как увеличение расстояния между электродами (рис. 2) требует большей глубины погружения.

В конце статьи приведена американская литература по вопросу расчета водяных реостатов большой мощности.

Н. А. Каулов

ИСПРАВЛЕНИЕ

В статье И. М. Сирота „О системе заземлений в электросетях низкого напряжения“ („Электричество“ № 13 за 1937 г.) допущены по вине типографии следующие ошибки, затрудняющие пользование статьей:

1. На стр. 30 четыре абзаца, начиная с заголовка „Замыкание на землю в сети низкого напряжения... и кончая словами „... при питании от необслуживаемых подстанций“ (правая колонка) должны быть перенесены на стр 29, правая колонка, 17 строка снизу, после слов „... равноценными при данном режиме“.

2. Стр. 31 — номера рис. 5 и 6 необходимо взаимно поменять.

ИЗДАТЕЛЬ ОНТИ

Технический редактор А. П. Александров
Зав. редакцией М. Г. Башкова

Отв. редактор Я. А. КЛИМОВИЦКИЙ

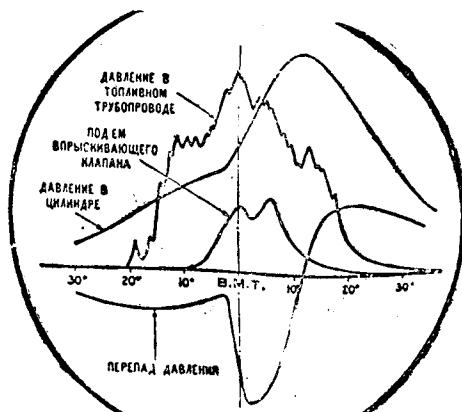
STANDARD-SUNBURY

КАТОДНЫЙ ИНДИКАТОР ДЛЯ БЫСТРОХОДНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ПРИГОДЕН ДЛЯ ВСЕХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СВЯЗИ С РАБОТОЙ:

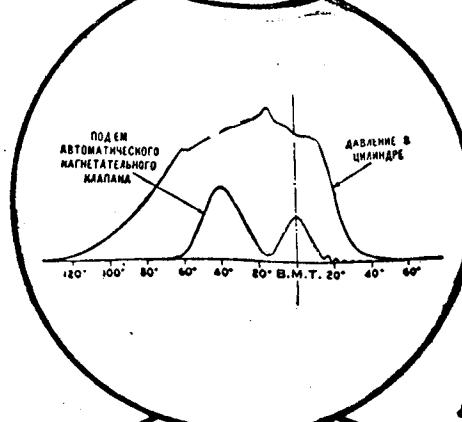
1. Дизель-Мотора

Давление в цилиндре, перепад этого давления, подъем впрыскивающего клапана и давление в топливном трубопроводе — показаны на помещенной рядом диаграмме. Многие другие вопросы, как, например, вибрация, скорость или смещение подвижных частей и т. д. тоже могут быть исследованы.



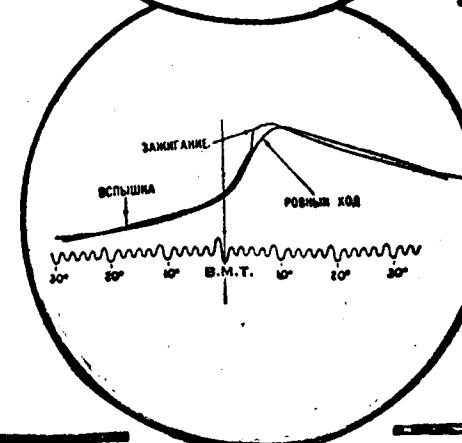
2. Нефтяного двигателя

Эта диаграмма показывает давление в цилиндре при нормальных условиях и в момент зажигания, а также градуированную шкалу, по которой можно определить точные промежутки времени.



3. Воздушного компрессора

Диаграммы давления в цилиндре и подъема автоматического нагнетательного клапана в воздушном компрессоре малых размеров показаны на помещенном рядом рисунке, который свидетельствует и о других возможностях применения индикатора Standard-Sunbury.



Standard Telephones and Cables Limited

NORT WOOLWICH, LONDON, E. 16 (Англия)