

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

14

1937

ОБЪЕДИНЕНОЕ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО



НОЕ НАУЧНО-
ИЗДАТЕЛЬСТВО

ПРИНИМАЮТСЯ ЗАКАЗЫ

на

ИЗГОТОВЛЕНИЕ НОМОГРАММ

НОМОГРАФИЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ ГЛАВНОЙ РЕДАКЦИИ
— ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ОНТИ —

ПРИНИМАЕТ ЗАКАЗЫ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ:

1. Полных номографических расчетов для любых технических объектов.
2. Отдельных номограмм.
3. Конструирование всевозможных счетных линеек.

К номограммам прилагается инструкция для пользования.

При заказе требуется заполнение специальных заказных карт, которые высыпаются номографической секцией.

Адрес: Москва, центр, Третьяковский проезд 1.

Номографическая секция Главной редакции технико-теоретической литературы
Тел. К 0-51-59, К 0-17-78.

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГОТЕХНИКУМ

ОБЪЯВЛЯЕТ

НАБОР СЛУШАТЕЛЕЙ НА 1937/38 УЧЕБНЫЙ ГОД

НА СЛЕДУЮЩИЕ СПЕЦИАЛЬНОСТИ: 1. Центральные электрические станции. 2. Электрооборудование промышленных предприятий. 3. Передача и распределение электрической энергии. 4. Паровые турбины. 5. Теплофикационные установки.

Срок обучения с отрывом от производства 4 года и без отрыва — 5 лет. Без отрыва от производства занятия происходят первые 4 года — 3 дня в шестидневку с 5 час. вечера до 9 ч. 30 м. вечера. Последний год с производства снимаются и выплачивается стипендия. Поступающим на занятия без отрыва от производства обязательно работать по соответствующей специальности.

Принятие испытания будут проходить с 16 по 25 августа по следующим предметам:

1. Математика. 2. Русский язык. 3. Политграмота. 4. География в объеме начальной средней школы.

Прием заявлений и дача справок ежедневно в помещении Техникума. Явка на испытания лишь после получения извещения о допуске к ним.

Адрес: Кропоткинская набережная, дом 11, тел. Г 6-86-42 Г 6-84-81

ДИРЕКЦИЯ МЭТ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ГОД ИЗДАНИЯ 58-й

14
1937
ИЮЛЬ

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

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Передовая — Против деляческого подхода к планированию электропромышленности в III пятилетке	1
Бирюков В. Г. О задачах электропромышленности СССР в III пятилетке	2
Асташев М. А. и Шейндин Н. М. — Принципы автоматизации подстанции с металлическими ртутными выпрямителями	6
Цверава Г. К. — Ртутно-выпрямительная установка Днепровского алюминиевого завода	10
Толвинский В. А. — Способы опытного определения постоянной самоторможения синхронных гидрогенераторов	16
Пиотровский Л. М. — Диаграмма токов индукционного двигателя с переменным индуктивным сопротивлением	23
Шляпошников Б. М. — Схема магистрального электровоза с ионным преобразователем	27
Садовский И. М. — Группа асинхронных двигателей в схеме „Электрического вала“	33
Буйлов А. Я. — Напряжение и сопротивление дугового промежутка	35
Павлов Л. И. — Влияние предварительной ионизации на вольтвременные характеристики	40
Кейм А. А. — Схемы счетчиков активной и реактивной энергии для 3 и 4-проводной сетей трехфазного тока	42
Лигоцкий Л. П. — Расчет передачи электроэнергии по железным многопроволочным проводам	47
Корсунцев А. В. — Подсобная номограмма для построения электрических полей с осевой симметрией	50

На обложке: Советский павильон на Парижской международной выставке

К ОБСУЖДЕНИЮ ПРОБЛЕМ III ПЯТИЛЕТКИ

Против деляческого подхода к планированию электропромышленности в III пятилетке

В ИЮНЕ с. г. на совещании при группе энергетики отделения технических наук Академии наук СССР были заслушаны доклады представителей Главэнергопрома В. Н. Ланина и ВЭИ — В. Г. Бирюкова о задачах советской электропромышленности в третьей пятилетке.

Доклад Главэнергопрома имел по обыкновению узковедомственный, деляческий характер. В нем не было ни следа самокритики, ни настоящего анализа узких мест в развитии электропромышленности, ни даже постановки вопроса о борьбе с последствиями вредительства в этой отрасли народного хозяйства. Как будто ничего не произошло, как будто в течение ряда лет в Главэнергопроме, в Главэнерго, на заводах электропромышленности не орудовала шайка троцкистско-бухаринских бандитов, двурушников, японо-немецких фашистских шпионов.

Наоборот, доклад Главэнергопрома пытался

создать впечатление известного благополучия с выполнением плана второй пятилетки.

«Нужно сказать, — заявил докладчик В. Н. Ланин, — что результаты выполнения второго пятилетнего плана в настоящий момент у нас довольно благоприятные и уровень нашего теперешнего производства весьма близок к тому, чтобы считать вторую пятилетку почти уже выполненной».

Таков типичный образчик бюрократического самодовольства, весьма характерный для работников Главэнергопрома, о котором «Правда» совершенно справедливо писала в номере от 24 июня с. г., что это «главк, который мешает и другим и себе».

«Результаты выполнения второй пятилетки довольно благоприятные», говорит представитель Главэнергопрома, а в это время комбинат «Электрозвоз» срывает работу автомобильной про-

мышленности. Из-за отсутствия генераторов завода АТЭ останавливался конвейер легковых автомобилей ЗИС. За пять месяцев 1937 г. ламповый завод того же комбината недодал 593 000 автоламп. Ни один из крупных заводов главка не выполняет плана 1937 г. На заводе «Динамо» им. Кирова срывается выпуск оборудования для троллейбусов. ХЭТЗ не обеспечивает поставку защитной аппаратуры для сетей Мосэнерго.

В упомянутом выше докладе Главэнергопрома в Академии наук основной упор был сделан на капитальные вложения в третьей пятилетке, фигурировали новые заводы и миллиарды рублей...

Сколько-нибудь связного анализа действительно узких мест и задач технической политики электропромышленности, вытекающих из потребностей развития народного хозяйства и электрификации СССР в целом, как уже сказано, в докладе не было.

Поэтому и получилось, что из поля зрения доклада выпал целый ряд важнейших участков электропромышленности, как, например, аккумуляторное, кабельное¹, светотехническое и другие производства. Забыта была и такая «мелочь», как производство защитной и автоматической аппаратуры и электроизмерительных приборов, без которых ничего не стоят все разговоры об экономии электроэнергии.

В тени осталось производство электробытовых приборов, которое должно иметь в третьей пятилетке резкое увеличение, а также — электроинструмента. Оказывается, что в деле производства электроинструмента Главэнергопром надеется не на себя, а на другие ведомства, на местную промышленность. И это тогда, когда выпуск электроинструмента приобретает особо важное значение для оснащения заводов, работающих на оборону нашей социалистической страны. В порядке иллюстрации на том же совещании проф. В. С. Кулебакин сообщил, что недавно в журнале «AEG Mitteilungen» был описан электроинструмент, применяемый в самолетостроении

¹ К слову сказать, оба эти производства почему-то вообще изъяты из ведения Главэнергопрома, как будто они не имеют никакого отношения к электропромышленности сильных токов! Ред.

и позволяющий в несколько раз ускорить и твление аэроплана.

Глубоко прав был акад. Г. М. Кржижановский в заключительной части совещания, который в жесткой критике доклады Главэнергопрома и ВЭИ, не сумевшие поставить вопрос о задачах электропромышленности в третьей пятилетке: всей необходимой широте. Акад. Г. М. Кржижановский обратил внимание на такие существенные вопросы электропромышленности, как подготовка и квалификация кадров, правила кооперации заводов, стандарты, нормы и, в частности, нормы и правила безопасности.

Из многочисленных сигналов последнего времени Главэнергопром не сделал пока для никаких практических выводов. А разве не было привлечь к составлению плана третьей пятилетки лучших стахановцев, инженеров и наилучших работников заводов, институтов и лабораторий, которые помогли бы главке освободить от узковедомственного подхода и полным голосом изложить перед советской общественностью НКТП, правительством и партией ответственные задачи электропромышленности в третьей пятилетке?

Это можно и нужно сделать немедленно.

**

Печатаемая ниже статья В. Г. Бирюкова представляет переработанный автором его доклад совещании в Академии наук о технических задачах электропромышленности в третьей пятилетке. Автор сделал здесь попытку составить перечень задач электропромышленности, но, и в докладе, автору не удалось избежать в заключительной части тех же недочетов, которые характеризовали доклад Главэнергопрома на совещании. Перечень страдает неполнотой охвата и недостаточностью критического анализа положения вещей в электропромышленности. Однако материал для обсуждения проблем электропромышленности в третьей пятилетке статьи Бирюкова имеет известный интерес, и редакция рассчитывает на получение ряда откликов читателей «Электричества» в связи с этим материалом.

О задачах электропромышленности СССР в III пятилетке

В. Г. Бирюков
ВЭИ

НЕСМОТРЯ на значительные темпы развития в течение двух пятилеток, энергетика резко отставала от развития других отраслей народного хозяйства СССР и лимитировала их дальнейший еще быстрый рост.

В этом отставании энергетики Союза сказалась вредительская деятельность агентов японо-германского фашизма, троцкистско-бухаринских предателей, которая была направлена на создание в энергетике всяческих диспропорций.

Политическая слепота, беспечность и делячество, проявленные руководителями Главэнергопрома и Главэнерго, отсутствие с их стороны какой-либо борьбы за принципиальные позиции

технической политики, диктуемой партией и правительством в области энергетики, способствовали подлой работе врагов народа.

Поэтому быстрейшая ликвидация последствий вредительства, диспропорций и узких мест является первой предпосылкой роста и развития электропромышленности и электрохозяйства в третьей пятилетке.

Ниже мы попытаемся дать в первом приближении примерный и, конечно, далеко не полный перечень технических задач советской электропромышленности в третьей пятилетке.

Сооружение в третьей пятилетке новых центров энергетики, объединение их в мощные

стемы — звенья будущей единой энергетической системы Союза, должно основываться на освоении электропромышленностью новых, более совершенных типов оборудования, с лучшими эксплоатационными характеристиками, большими мощностями, с меньшими габаритами и весами.

Это оборудование должно также отвечать требованию максимального повышения производительности труда как в самой энергетике, так и во всех отраслях народного хозяйства.

В соответствии с этими требованиями перед заводами электропромышленности, ее научно-исследовательскими институтами и заводскими лабораториями в третьей пятилетке стоит задача на основе своего опыта и опыта передовых электротехнических фирм США и Западной Европы дать высококачественное оборудование нашему электрохозяйству.

В области крупного турбо- и гидрогенераторостроения на первый план выступает задача организаций производства турбогенераторов 100 MW на 3000 об/мин, разработки и освоения турбогенераторов 200 MW и гидрогенераторов зонтичного типа в 60—100 MW.

Требование уменьшения габаритов, весов и потерь ставит на очередь вопросы повышения напряжения мощных генераторов до 33—66 kV и выше¹, применения для их охлаждения водорода, масла, солова вместо воздуха, создания совершенно закрытых машин для работы на открытом воздухе с теми же агентами охлаждения (например синхронных компенсаторов, преобразователей частоты).

Разработка и освоение высоковольтных турбогенераторов на 33 и 66 kV для работы на кабельную сеть и таких же грозоупорных генераторов, предназначенных для работы на воздушную сеть, — является актуальной задачей наших машиностроительных заводов.

Опыт освоения производства мощных высоковольтных генераторов и их удачная эксплоатация за границей, опыт завода «Электросила» и ХЭТЗ говорят за то, что это дело вполне по плечу нашим заводам.

Рост мощности и протяженности линий электропередач наших энергосистем, особенно в связи с сооружением в третьей пятилетке крупных гидростанций, в первую очередь гидростанций Большой Волги, выдвигает перед электропромышленностью требование, во-первых, дальнейшего усовершенствования высоковольтной аппаратуры: трансформаторов, выключателей, изоляторов, во-вторых, разработки и освоения оборудования на более высокое напряжение до 400 kV и, в-третьих, освоения специальной аппаратуры для поддержания устойчивости параллельной работы систем.

Электропромышленность должна поставить серийное производство грозоупорных трансформаторов на напряжения от 33 до 220 kV — этого основного напряжения линий электропередач в новой пятилетке, причем все эти трансформаторы должны быть с регулировкой под напряжением. Освоение трансформаторов напряжений

в фарфоровых кожухах на все диапазоны напряжения и измерительных трансформаторов высших классов точностей — должно также быть включено в план. К этой же группе относится освоение Московским трансформаторным заводом серийного производства испытательных трансформаторов до 1500 kV, а также освоение новых типов реакторов в масле на высокие напряжения с железным и фарфоровым кожухом, новых типов компенсированных реакторов с железом.

В области выпуска высоковольтных выключателей первоочередной задачей электропромышленности для ликвидации имеющегося здесь большого отставания должно быть форсированное освоение серийного производства на все диапазоны напряжений до 220 kV включительно с малым временем отключения: малообъемных масляных выключателей, безмасляных выключателей с сухими газогенерирующими материалами, освоение безмасляных выключателей переменного тока высокого напряжения, основанных на новых принципах действия.

В первые же годы третьей пятилетки должны быть разработаны и освоены: выключатели с приводами для автоматического повторного выключения, разъединители мощности на 10 и 35 kV в комплексе с плавкими предохранителями большой мощности, надежно действующие мощные плавкие предохранители на напряжения до 110 kV.

В части защитной от перенапряжений аппаратуры на основе эксплоатационного опыта должны быть в течение 1938 г. усовершенствованы разрядники на все диапазоны напряжений — до 220 kV.

Изоляторные заводы должны дать нашим энергосистемам новые конструкции изоляторов, обеспечивающих безаварийную работу в загрязненных районах.

Борьба со старением изоляторов, пересмотр и переработка всех типов изоляторов с точки зрения координации изоляции всей системы также являются задачей первых годов третьей пятилетки.

Наряду с перечисленными выше задачами по усовершенствованию высоковольтной аппаратуры, которые потребуют от электропромышленности и ее исследовательской базы большой работы, но не являются принципиально чем-то новым — перед электропромышленностью нашего Союза встает огромная задача создания оборудования на напряжение в 400 kV.

Такое напряжение до сих пор нигде в мире не освоено (в США на Болдер-Дам — 287 kV). Это ставит перед электропромышленностью и ее исследовательской базой ряд новых задач как в области научной работы, так и в области производства.

Освоение грозоупорных силовых трансформаторов, трансформаторов напряжения и тока и реакторов на 400 kV, выключателя на 400 kV, 4000—5000 MVA разрывной мощности, со временем действия в 0,05—0,06 сек (на Болдер-Дам при 287 kV, 3000 MVA, время действия 5—6 полупериодов), защитной аппаратуры и фарфоровой изоляции (втулок) на то же напряжение — вот краткий перечень ближайших перед электропро-

¹ О преимуществах и выгодах для электрохозяйства генераторов повышенного напряжения см. статью т. Зеликсона в № 9—10 «Электричества», 1937.

мышленностью задач в связи с освоением оборудования на 400 кВ.

Высоковольтные линии электропередач старых и вновь сооружаемых в третьей пятилетке энергосистем будут проходить по самым разнообразным климатическим районам Союза с различным характером грозовой деятельности. Безаварийная работа этих систем при таких условиях, правильный выбор уровней изоляции оборудования выдвигают необходимость изучения грозовой напряженности различных районов Союза, изучения параметров молний путем организации широкой сети полевых лабораторий, а также и изыскание более эффективных и принципиально новых методов защиты от поражения молнией сооружений, взамен громоздких диверторов и пр., ныне применяемых.

Передача больших мощностей на далекие расстояния наиболее просто и экономно могла бы быть осуществлена путем применения постоянного тока высокого напряжения. Однако наша и заграничная электропромышленность в настоящее время не имеют для осуществления этой задачи достаточно разработанных средств, уровень которых сейчас стоит значительно ниже уровня техники переменного тока.

Теоретическое и практическое разрешение проблемы генерирования и преобразования постоянного тока высокого напряжения путем создания мощных высоковольтных машин постоянного тока на напряжение до 100 кВ, статических высоковольтных выпрямителей на напряжение в 400 кВ при 100—200 А, мощных ртутных выпрямителей на 100 кВ и опытной электропередачи постоянным током высокого напряжения наша электропромышленность должна осуществить в третьей пятилетке для сравнения и правильного выбора наиболее экономически выгодной системы передачи электрической энергии.

Реконструкция городов Союза, в первую очередь Москвы, необходимость в связи со строительством мощных ТЭЦ передачи внутри городов больших потоков электрической энергии ставят перед нами задачу выбора и освоения наиболее надежного и дешевого типа высоковольтного кабеля и арматуры для него на напряжение в 110 и 220 кВ, уже широко применяемых в практике заграницы (США, Англия, Франция, Италия, Германия). Большие преимущества применения кабеля при компоновке схемы, расположения высоковольтных подстанций и переходов через большие водные пространства настоятельно выдвигают перед нами задачу создания освоения кабеля на напряжение 400 кВ, наличие которого значительно облегчит и удешевит сооружение станций и подстанций гидроузлов Большой Волги.

Осуществление бесперебойного электроснабжения народного хозяйства, задача дальнейшего увеличения производительности труда обязывают электропромышленность обеспечить широкую автоматизацию процессов (управление, контроль) производства, передачи и потребления электрической энергии.

Электропромышленность Союза должна разработать и освоить в производстве и эксплуатации как наиболее совершенные схемы, так и приборы

для автоматизации и защиты в первую очередь энергетических систем, металлургической, металлообрабатывающей и угольной промышленности.

Современная же автоматика, основываясь на широком применении ионной и электронной аппаратуры, требует освоения новых типов высокочувствительных, с большой отдачей, фотоэлементов, мощных тиристоров высокого напряжения и с длительным сроком работы и т. д.

Для обеспечения более экономного расходования электрической энергии ее потребителям в третьей пятилетке, электропромышленность должна обеспечить выпуск оборудования, обладающего улучшенными эксплоатационными характеристиками специальных машин для электроприводов; машин повышенной частоты различных систем, встроенных двигателей, машин с широким пределом регулирования скорости постоянного и переменного тока. Нужно работать над дальнейшим усовершенствованием регулирующего привода с ртутным выпрямителем и машинами постоянного тока над применением высокогооборотных двигателей постоянного тока машин прямолинейного движения, тихоходных машин, основанных на принципе зубцовых полей и электропривода с бесколлекторным вентильным двигателем.

Борьба за меньшие потери выдвигает задачу широкого применения в электромашиностроении постоянных магнитов из алюминиево-никелевых сталей.

Широкое строительство электрифицированных железных дорог в третьей пятилетке связано с необходимостью окончательного выбора системы тока и наиболее совершенного типа электропоезда. Электропромышленность Союза должна создать коллекторные однофазные двигатели переменного тока, а также двигатели постоянного тока на напряжение в 3—6 кВ.

Наличие этих двух типов двигателей, надежных в эксплуатации, позволит выбрать наиболее удобную и экономичную систему тока для электрификации железных дорог.

Повышение коэффициента полезного действия электрифицированных ж. д. выдвигает перед нашей электропромышленностью задачу широкого внедрения рекуперации электрической энергии в практику эксплуатации ж. д. транспорта.

В связи с большой протяженностью электрифицированных ж. д., проходящих через различные грозовые районы, электропромышленность должна обеспечить эксплуатацию этих ж. д. разрядниками для защиты установок постоянного тока.

Химическая промышленность требует разработки и освоения электротехнического оборудования (моторы и светотехническая арматура) для работы в условиях химического производства.

Резко должно быть изменено существующее положение с производством светотехнической арматуры вообще.

Из-за отсутствия достаточного производства светотехнической арматуры огромное количество электроэнергии расходуется с большими потерями. Освоение уже разработанных типов светотехнической арматуры, создание новых типов зеркальной, прозрачной, симметрической и

несимметрической арматуры, применение новых светотехнических материалов для арматуры: пластмассы, картона, бумаги и пр., является неотложной задачей.

В области применения новых источников света должно быть обращено внимание на источники света с максимальной световой экономичностью, экономичные источники света с исправленной цветностью и источники с высокой яркостью. Создание газосветных ламп со светоотдачей не ниже 80 люмен на ватт с продолжительностью горения не ниже 3000 час. и ламп с более низкими эксплоатационными показателями, но с экономичностью около 120 на ватт, должно разрешить первую из этих задач.

Другим путем разрешения той же задачи должно быть создание ламп низкого давления с применением катодо-люминисценции, со светоотдачей около 100 люмен на ватт.

Для решения второй задачи — исправления цветности ламп, — должны быть использованы люминисцирующие вещества, с нанесением их на лампу и осветительную арматуру.

Для разрешения третьей задачи получения новых источников света с высокой яркостью электропромышленность должна разработать и освоить образцы ртутных ламп сверхвысокого давления с яркостью примерно 20 000 стильбов при воздушном охлаждении и 50—80 000 стильбов при водяном охлаждении.

Для удовлетворения той же задачи экономии электроэнергии электропромышленность должна в большей степени, чем это она делала до сих пор, обеспечить потребителей электроэнергии более совершенными и экономными видами статических конденсаторов.

Все поставленные выше задачи не смогут быть удовлетворительно разрешены электропромышленностью, если ею не будет проведена большая исследовательская и производственная работа по освоению новых более совершенных видов изоляционных, а также магнитных и проводниковых материалов.

Заводы электротехнических и изоляционных материалов должны обеспечить в третьей пятилетке выпуск теплостойкой, влагостойкой и химически стойкой изоляции высокого качества.

Дальнейшее развитие высоковольтного аппаратостроения требует улучшения трансформаторного масла и приспособления его для работы в различных климатических условиях (арктических и др.), с одной стороны, и создания синтетической жидкой изоляции для трансформаторов и выключателей — с другой.

Положительный опыт ВЭИ по разработке и освоению изоляции, представляющей собою композицию органических и неорганических веществ, ставит задачу дальнейшего усовершенствования этого типа изоляции и применения ее в различных видах электротехнического оборудования.

Относительно высокие электрические характеристики компонентов, применяемых нами в настоящее время в электротехническом изоляционных материалов, и более низкие электрические характеристики уже готовой изоляционной

продукции свидетельствуют о необходимости коренного улучшения технологических процессов при разработке изоляционных материалов: мика-нита, гетинакса, дельта-асбестовой изоляции и т. д.

Задача получения новых типов выключателей, разъединителей и предохранителей с меньшими габаритами выдвигает перед изоляционной и химической промышленностью создание синтетических жидкостей и твердых типов изоляции, выделяющей газы и не теряющей при этом своих изоляционных свойств.

Повышение качества обмоточной бумаги является тем требованием, которое электропромышленность должна предъявить нашей бумажной промышленности.

Повышение качественных показателей нашего электротехнического и высоковольтного оборудования не может быть удовлетворительно разрешено без решительного улучшения качества применяемых в электротехническом магнитных материалов. До сего времени наша качественная металлургия не удовлетворяла запросов электропромышленности в этом отношении.

Электропромышленность должна совместно с металлургическими заводами освоить более совершенные виды магнитных материалов. Здесь требуется: улучшение трансформаторной стали для силовых трансформаторов, снижение потерь в ней по крайней мере до 0,8 W/kg, повышение проницаемости до 20 000; создание специальных сортов трансформаторной стали с высокой начальной и максимальной проницаемостью для измерительных трансформаторов (с повышенной начальной проницаемостью 1000—1500 и максимальной проницаемостью 15—20 000); создание специальных сортов раскисленного армко-железа для реле, электромагнитов и т. п. с высокой проницаемостью и малым гистерезисом; освоение сплавов с высокой проницаемостью типа пермаллоя; разработка и дальнейшее усовершенствование сталей для постоянных магнитов; улучшение свойств и широкое внедрение сплавов типа хромаль для замены никрома; создание железных сплавов с малым температурным коэффициентом для замены константана.

Эти работы должны вестись как путем кооперации с металлургией, так и путем организации полупромышленных установок в системе самой электропромышленности.

Для обеспечения производства всех видов электротехнического оборудования должна быть налажена четкая кооперация между работой отдельных заводов электропромышленности, входящих в различные главки НКТП: Главэнергопрома, Главцветметобработки, Главхимпрома, ГУМП, и заводами других наркоматов: Наркомата обороны промышленности, Наркоммостпрома, Наркомлегпрома, Наркомлеса.

Только правильное сочетание и использование сил и возможностей всех заводов независимо от их ведомственной принадлежности может обеспечить как высокое качество выпускаемой электропромышленностью продукции, так и ее комплектность.

Принципы автоматизации подстанции с металлическими ртутными выпрямителями

М. А. Асташев и Н. М. Шейндлин
Завод „Электросила“ им. С. М. Киров

ПРИВОДИМЫЕ ниже схемы базируются на принципах автоматизации подстанции с ртутными выпрямителями, принятых за основу завода «Электросила» им. т. Кирова. Эти схемы не нужно рассматривать как обязательные к исполнению, но осуществляемые ими принципы работы установки являются требованием завода.

На рис. 2 и рис. 3 даны схемы подготовки к пуску. Комплекс работы составляющей их аппаратуры, воздействуя на аппараты схемы рис. 1, включает или отключает ртутные выпрямители по желанию управляющего подстанцией. Схемы рис. 2 и рис. 3 составлены для трех выпрямителей, схема рис. 1 — для одного. Расшифровка символов последней схемы и взаимная связь реле приведены в следующей таблице.

Подстанция должна управляться двумя способами: от руки на самой подстанции и с диспетчерского пункта посредством телемеханики. Способы управления должны быть независимы друг от друга, а также должна исключаться возможность вмешательства одного из них при работе другого. На схеме рис. 2 это условно обозначено перекидным рубильником P .

Включение выпрямителей. Первоначальный пуск подстанции осуществляется включением одного

выпрямителя, который называется ведущим и определяет дальнейший порядок работы выпрямителей.

При замыкании на подстанции кнопки *КП* при включении реле *ТВ* в случае управления центрального поста возбуждается реле *УП* (рис. 2). Замыкается контакт *УП-1*, которым рел «держит» себя и определяет ведущую роль выпрямителя. Одновременно замыкается контакт *УП-2*, включающий главный контактор *КГ*. Этот контактор замыкает контакт *КГ-1* и блокирует размыкает контакт *КГ-2* в цепи катушки *ОВ* выключателя, подготавливая масляник к выключению, замыкает *КГ-3* и тем самым возбуждает (при условии нормального давления в выпрямителе *УВП-1* замкнут) реле *ВВМ*.

Одновременно размыкается контакт *КГ-4* и линия, шащает возбуждения реле *КГП*, которое через одну секунду размыкает свой контакт *КГП-1*, подготовляя реле *ВВМ* к повторному включению.

BVM, возбуждаясь при замыкании *КГ-3*, замыкает контакт *BVM-1* и возбуждает реле *ВАБ*, которое блокируется контактом *ВАБ-1*, и размыкает контакт *ВАБ-2*, не препятствует включению масляника.

Одновременно замыкается контакт *VBM-2*.

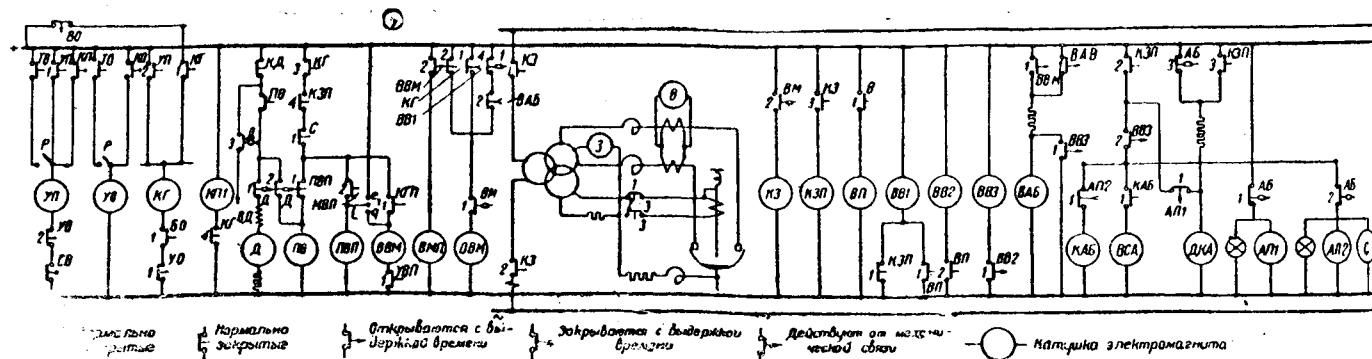
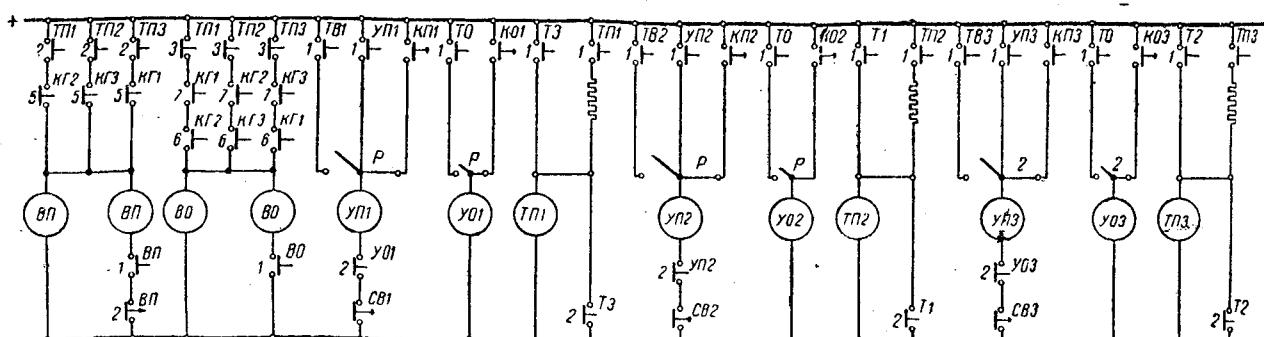


Рис. 1



Символ	Расшифровка символа	Воздействует на
ВМ	Блок-контакты масляного выключателя	ОВМ, КЗ
КЗ	Контактор зажигания и возбуждения ртутного выпрямителя	Трансформатор зажигания и возбуждения, КЗП
КЗП	Реле контактора зажигания промежуточное	ВВ1, схему быстродействующего автомата, ДКА. Схему повторного включения
В	Реле возбуждения	ВП
ВП	воздушного промежуточного	ВВ1, ВВ2
ВВ1	времени возбуждения 1-е	ОВМ
ВВ2	2-е	ВВ3
ВВ3	3-е	ВАБ, схему быстродействующего автомата ВСА
КНВ	Контактор быстродействующего автомата (включающий)	Включающий рычаг быстродействующего автомата
ВСА	Включающий соленоид быстродействующего автомата	ОВМ, ДКА, АП1, АП2, С
АБ	Блок-контакты быстродействующего автомата	ДКА, КГ(рис.3)
АП1	Автомата быстродействующего промежуточного 1-е	КАБ, КГ(рис. 3)
АП2	Автомата быстродействующего промежуточного 2-е	ВВМ, ПВ, ПВП, КГ (рис. 3)
С	Реле связи между ВМ и АБ	УП
ТВ	Телемеханическое включение (на рис.1 показаны только контакты)	УП
КП	Кнопка пуска (для ручного включения с подстанции)	УП
СВ	Кнопка смены ведущих выпрямителей	УП
ТО	Телемеханическое отключение (на рис. 1 показаны только контакты)	УО
УО	Установка отключается	УП, КГ
УП	" пущена	КГ
КГ	Контактор главный	КГ, ОВМ, ВВМ, КГП, ПВП, ПВ
ОВМ	Отключающая катушка масляного выключателя	Действует на отключение масляного выключателя
ПВП	Реле повторного включения, промежуточное	ПВП, ПВ
ПВ	Электромагнитное реле повторного включения	Д
Д	Двигатель реле повторного включения	ПВ, ВВМ, Д, блокировку
КГП	Реле контактора главного, промежуточное	ВВМ
ВВМ	Реле включения масляного выключателя	ВМП, ВАБ
ВМП	Реле масляного выключателя, промежуточное	Включающую катушку масляного выключателя
ВАБ	Реле времени быстродействующего автомата	ВАБ, ОВМ

Возбуждается реле ВМП. Масляник включается, замыкает контакты ВМ-1, подготовив этим свое отключение, и ВМ-2. При этом возбуждается кон-

тактор КЗ, замыкаются КЗ-1 и КЗ-2, включается трансформатор возбуждения и зажигания.

Одновременно замыкается КЗ-3 и возбуждается реле КЗП.

Реле КЗП размыкает контакт КЗП-1 и лишает возбуждения реле ВВ1, которое отключается через пять секунд.

Замыкается контакт КЗП-2 и форсирует держащую катушку быстродействующего автомата ДКА.

Замыкается контакт КЗП-3 и создает параллельную цепь питания ДКА. Размыкается КЗП-4, устраняя повторное включение. Если после включения трансформатора возбуждения и зажигания через пять секунд не возникнет дуга возбуждения, — реле ВВ1 отключится, замкнется ВВ1-1 и масляник отключится.

При возникновении дуги возбуждения выпрямителя возбуждается реле В, включенное в цепь анодов возбуждения через трансформаторы тока, изолирующие реле от высокого потенциала выпрямителя.

Замыкается В-1 и возбуждается реле ВП. Замыкается ВП-1, и масляник остается включенным. Замыкается ВП-2 и возбуждает реле ВВ2.

Замыкается ВВ2-1 и возбуждает ВВ3.

При этом замыкается ВВ3-1 и шунтирует через сопротивление катушку реле ВАБ, которое отключится через одну секунду. Если за это время не включится быстродействующий автомат, контакт АБ-4 останется замкнутым, и масляник отключится.

Реле ВВ3, включаясь, замыкает ВВ3-2, при этом возбуждается контактор КАБ. Замыкается КАБ-1 и возбуждает включающий соленоид ВСА. Быстродействующий автомат включается. Размыкается блокконтакт АБ-1, гасит зеленую лампу и лишает возбуждения реле АП-1, которое отключится через одну-две секунды. Замыкается АБ-2, зажигает красную лампу, возбуждает реле автомата АП2 и возбуждает реле С (связи быстродействующего автомата и масляного выключателя). Размыкается АБ-4 и не дает маслянику отключиться.

Размыкается АБ-3 и подготовляет быстродействующий автомат к отключению. АП2, возбудившись, размыкает АП2-1. Отключается контактор автомата, включающий соленоид, и замыкаются главные контакты быстродействующего автомата. Через некоторое время отключается форсировка держащей катушки при размыкании контакта АП1-1. Таким образом требование завода «Электросила», чтобы форсировка держащей катушки отключалась через некоторое время после включения главных контактов автомата, — выдержано.

Реле С, включаясь, размыкает контакты С1 и С2 и этим дает сигнал в разные части схемы, что быстродействующий автомат включен.

Последовательность работы схемы гарантирует порядок включения выпрямителя, установленный заводом «Электросила» и сводящийся к следующему:

- 1) включается масляный выключатель;
 - 2) открывается проток воды, охлаждающей выпрямитель;
 - 3) включается зажигание и возбуждение;
 - 4) включается быстродействующий автомат.
- Контакты КЗП-2 и ВВ3 необходимо предусмотреть.

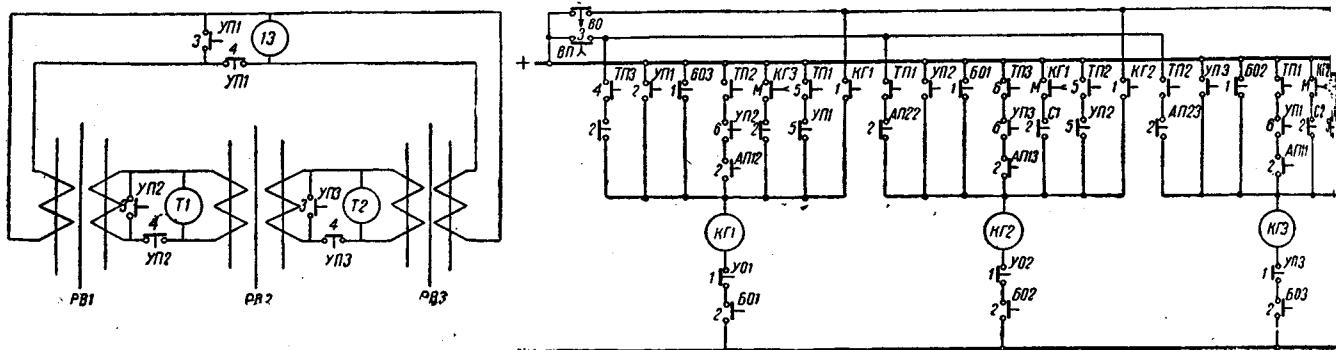


Рис. 3

реть массивным, так как через них в момент включения быстродействующего автомата должен проходить кратковременно ток порядка 60—80 А.

Нормальное отключение установки. Отключение производится в следующем порядке:

- 1) отключается масляный выключатель;
 - 2) отключается возбуждение;
 - 3) отключается быстродействующий автомат;
 - 4) закрывается охлаждающая вода.

Операции первую и четвертую можно осуществить одновременно при замыкании на подстанции кнопки *КО* или при воздействии на реле *TO*, возбуждается реле *УО* (рис. 1 и 2).

Размыкаются контакты *УО-2* и *УО-1*, отключается главный контактор *КГ* и реле *УП*.

Размыкаются контакты $KG1$, $KG3$; последний отключает реле повторного включения. Замыкается $KG2$ и возбуждает отключающую катушку масляника. Масляник отключается и контактом $BM1$ рвет цепь питания отключающей катушки. $BM2$, размыкаясь, отключает контактор зажигания. Размыкаются $K3-1$ и $K3-2$ и отключают возбуждение.

Контакт *К3-3* отключает реле *К3П*. Размыкается *К3П2* и отключает цепь форсировки автомата.

Размыкается контакт $K3P3$ и отключает быстродействующий автомат. Контакт $AP2-1$ замыкается после размыкания $K3P2$ через одну секунду, что устраняет звонковое действие автомата. Контакт $BB3-2$ отключится, лишь спустя шесть секунд после исчезновения дуги возбуждения. Быстродействующий автомат, отключаясь контактом $AB3$, замыкает цепь питания держащей катушки. Таким образом схема предусматривает, помимо порядка отключения, следующие особенности схемы быстродействующего автомата:

- 1) держащая катушка автомата форсируется перед включением;

2) форсировка отключается через некоторое время после замыкания главных контактов автомата;

3) держащая катушка питается непрерывно;
 4) устраняется звонковое действие автомата.

Следует несколько подробнее остановиться на назначении реле $BB1$, $BB2$ и $BB3$.

мя работы выпрямителя, то потеряют возбуждение реле $BB1$ и $BB2$. Первое замкнет через 1 секунду контакт $BB1-1$ и, если к этому времени га возбуждения вновь не возникнет, — масляный выключатель отключится. Реле $BB2$ через 1 секунду разомкнет контакт $BB2-1$ и лишит возбуждения реле $BB3$. Реле $BB3$, в свою очередь, через одну секунду разомкнет контакт $BB3-1$ и быстродействующий автомат отключится на секунду, а также масляного выключателя. Таким образом, отключается разрыв цепи главного тока контакта быстродействующего автомата, что недопустимо при нормальной работе автоматической подсечки.

Реле $BB2$ и $BB3$ предохраняют также от «дегенерации» быстродействующий автомат, вследствие возможного неустойчивого режима возбуждения при включении установки.

Повторное включение. При аварийном отключении установки (короткое замыкание, обратное зажигание) замыкаются контакт *КЗП4* и реле в цепи питания реле повторного включения. Воздействие на буждается электромагнит реле повторного включения *ПВ*. Замыкаются контакты *ПВ* и электромагнит блокируется. Одновременно получает питание электродвигатель реле *Д*. Через некоторое время замыкаются контакты *Le* и реле *ПВ* разомкнет контакт *ПВП1* и замкнет *ПВП2*, блокируясь при этом. Примерно через пять секунд замкнутся контакты *Lg*, и при условии нормального вакуума (УВП1 замкнут) возбуждается реле *ВВМ*. Установка включается, и рвется цепь питания повторного включения. Реле *ПВП* размыкает контакт *ПВП2*, нарушая свою блокировку, и замыкает *ПВП1*.

Электродвигатель 'Д, продолжая вращаться аналогично первому случаю замыкает контакт *Le*, но реле *ВВР*, получив импульс, не блокируется и через некоторое время размыкается *Д2*.

При этом рвется цепь питания электромагнита *ПВ*. Контакты *ПВ* размыкаются, останавливают генератор. Механизм реле возвращается в исходное положение. Если масляный выключатель не «ожигает», — реле повторного включения производит еще два повторных замыкания катушки *ВВМ*.

Если и при третьем включении масляный выключатель не «держит», размыкается контакт D_3 , который через промежуточное реле и реле общей блокировки (на схеме не показаны) отключает главный контактор. Вернувшись в исходное положение, выключатель D_3 замыкает контакт D_2 , который включает масляный выключатель.

всю систему в исходное положение можно только с подстанции замыканием кнопки *КД*. Схемы рис. 2 и 3 осуществляют следующие операции:

1. Включение любого числа выпрямителей в работу.

2. Отключение любого числа выпрямителей.

3. Подключение выпрямителей при перегрузке на подстанции.

В этом случае максимальные реле *T*, включенные в цепь трансформаторов тока (рис. 3), возбуждают соответственно реле *TP* (токовые промежуточные) (рис. 2), а эти, в свою очередь действуя на моторное реле *BP* (времени подключения), включают выпрямитель.

4. Отключение выпрямителей при спадании нагрузки на подстанции ниже определенного предела.

В этом случае комплексное действие реле *T* и *TP*, воздействуя на моторное реле *BO* (времени отключения), отключают выпрямитель.

Комбинации контактов в цепях катушек реле (рис. 3) дают следующие операции в цепи главного контактора *KГ-1* первого выпрямителя.

1. Контакт *BO3-1* реле общей блокировки (не показанного на схеме), замыкаясь при отключении благодаря действию одной из его блокировок, выпрямителя 3 подключает выпрямитель 1.

2. Если в момент перегрузки подстанции отключится одна из блокировок выпрямитель 2, который был ведущим, замкнется контакт *AP12-2* и подключит выпрямитель 1.

3. При включении *KГ3* заводится соединенное с ним маятниковое реле времени (на схеме не показано) и через пять секунд замкнет свой контакт *KГ3-M*. Если к этому времени не включится выпрямитель 3, контакт *C3-2* останется замкнутым и включится выпрямитель 1.

4. Все выпрямители на подстанции включены. Выпрямитель 2 ведущий. Контакт *UP2-3* замкнут, контакт *UP2-4* разомкнут (рис. 3). Через обмотки реле *T2* и *T3* протекает ток трансформаторов тока двух выпрямителей, по реле *T1* — от трансформатора тока одного выпрямителя. Нагрузка на подстанции упала до 50%, размыкается контакт *TP1-5* и контакт моторного реле *BO-2*, и выпрямитель 1 отключается.

Элементы, непосредственно обслуживающие вы-

прямитель. Электрический вакууметр. Для получения сигналов и осуществления операций в схеме управления подстанции в соответствии с давлением в выпрямителе служит электрический вакууметр (рис. 4). Схема вакууметра состоит из:

1) моста купроксовых выпрямителей, включенных по схеме Греца, с питающим трансформатором и стабилизатором напряжения;

2) неуравновешенного моста сопротивлений с активным плечом из платиновой проволоки в вакууме, сопротивление которой меняется одновременно с давлением в выпрямителе вследствие изменения условий теплоотдачи;

3) контактного гальванометра.

Схема получает питание от сети переменного тока через изолирующий трансформатор *TI* 220/220 В, служащий для потенциального разъединения цепей электрического вакууметра, находящихся под потенциалом выпрямителя, и цепи оперативного тока.

Мост купроксовых выпрямителей *MK* питается от трансформатора купроксов *TK* 220/13 В и дает напряжение выпрямленного тока 4 В. Это напряжение подается на мост стабилизации напряжения *CH*, а оттуда на мост измерения давления в выпрямителе *MP*. В диагональ последнего моста включен контактный гальванометр *KГ*.

При изменении давления в выпрямителе рамка гальванометра получает вращение.

Встроенный в гальванометр двигатель Уорена *DУ*, с помощью сидящего на его валу эксцентрика, сообщает возвратно-поступательное движение металлической скобе (на рисунке не показана), которая периодически замыкает ртутные контакты *B*. На мгновение ранее скоба через стрелку прибора замыкает один из ртутных контактов, нормального, ухудшенного или аварийного давления, в зависимости от состояния давления в выпрямителе. Контакты при ходе скобы вверх возвращаются пружинами в исходное положение. При замыкании контактов *НВ*, *УВ*, *AB* и *B* возбуждаются соответственно катушки держащих и блокирующих электромагнитов *ДНВ*, *ДУВ* или *ДAB* и катушки *БНВ*, *БУВ* и *БAB*. Эти шесть катушек попарно воздействуют на один из оперативных контактов, который, размыкаясь, рвет цепь питания соответствующего промежуточного

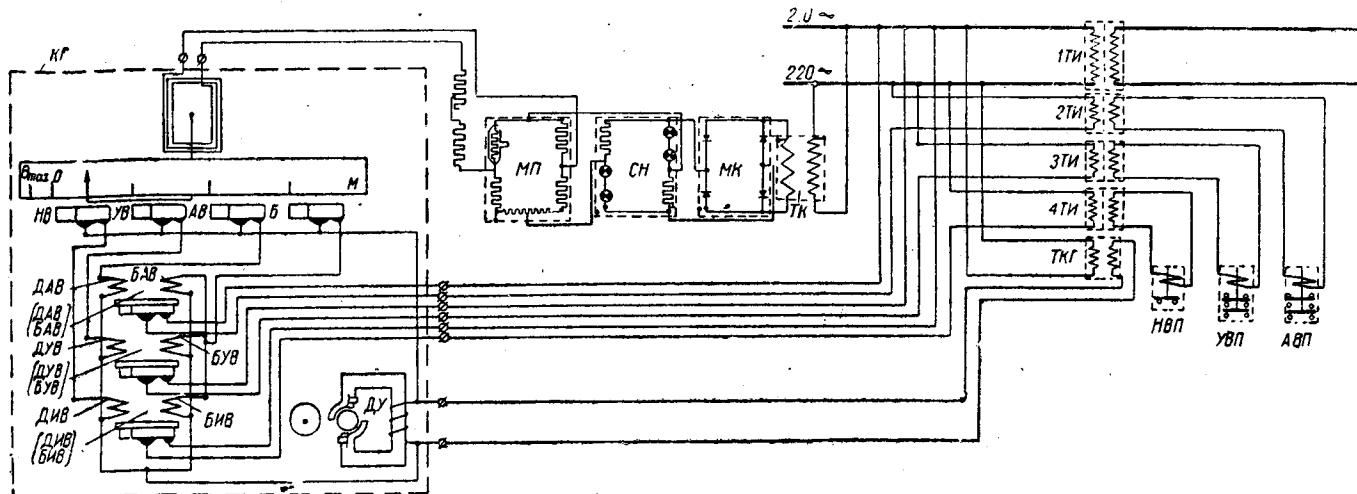


Рис. 4

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

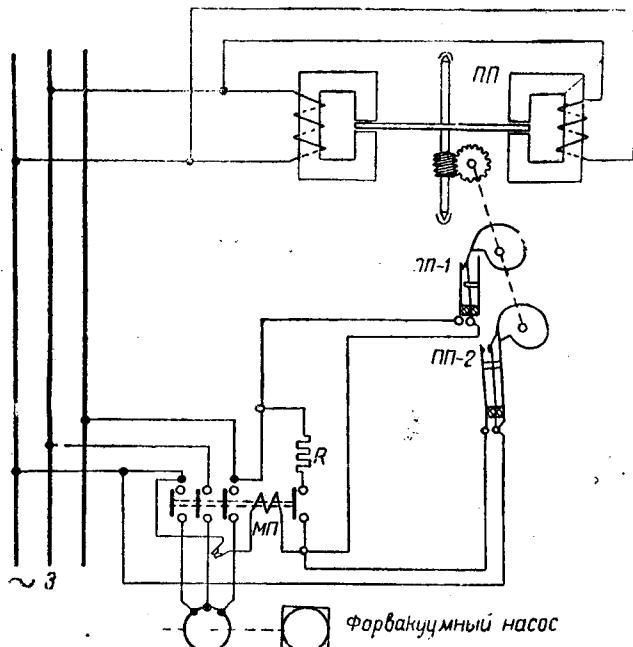


Рис. 5

реле, включенного через изолирующий трансформатор 2ТИ, 3ТИ или 4ТИ и дает соответствующую блокировку.

Управление форвакуумным насосом. На рис. 5 представлена схема периодического включения форвакуумного насоса при помощи реле периодического пуска *ПП* системы инж. Рашковского.

Это реле, постоянно включенное в сеть, периодически замыкает свои контакты. Контакт *ПП1*, замкнувшись, включает катушку магнитного пуск-
кого якоря *М1* системы *Лихачевского*.

кателя $МП$ (и затем примерно через секунду размыкается). Магнитный пускатель включается, пускает двигатель форвакуумного насоса и замыкает цепь питания своей катушки контактом $МП1$. Через некоторое время замыкается контакт $ПП$ и через сопротивление R шунтирует катушку $МП$. Двигатель останавливается. Включение насоса завода «Электросила» осуществляется через два часа на 15 min работы.

Блокировка и сигнализация: 1. Если давление в выпрямителе $2 \div 5 \mu\text{Hg}$, контакт ухудшенного давления УВ электрического вакуумметра не дает включиться. Даются звуковой и световой сигналы

2. Когда давление достигло аварийного предела (выше 5 μ Hg) аварийный контакт AB электрического вакууметра отключает установку.

3. При температуре охлаждающей воды ниже 35° или выше 45° установка отключается.

4. Она также отключается, если перегорел нагревательный элемент ртутного насоса.

5. При перерыве струи воды, охлаждающей ртутный насос, водяное реле ртутного насоса

6. Операции вторая-пятая сопровождаются размыкает свои контакты с выдержкой времени.

звуковым и световым сигналами. После трехкратного повторного включения установка блокируется с возможностью последующего включения только с подстанции.

7. Осуществляются нормальные блокировки силового трансформатора (газовое и температурное реле).

Все блокировки сводятся в цепь питания одного реле общей блокировки *OB*, которое своими контактами *OB1* и *OB2* (рис. 1 и рис. 3), управляя главным контактором, управляет тем самым выпрямителем.

Ртутно-выпрямительная установка Днепровского алюминиевого завода

Г. К. Цверава

Днепровский алюминиевый завод

Расширение существующих преобразовательных подстанций для электролиза алюминия и строительство новых электролитных заводов (УАЗ, Чирчик) потребовало срочного выбора более совершенных, чем моторгенераторы, преобразователей отечественного производства. Было решено на существующей преобразовательной подстанции¹ Днепровского алюминиевого завода им. Кирова смонтировать опытную ртутно-выпрямительную установку для выяснения всех особенностей предстоящей работы и пригодности агрегатов. Заказ на основное оборудование был передан заводу «Электросила», который поставил первый мощный советский выпрямитель типа РВ-70 с управляемыми сетками. Трансформаторы были поставлены Московским трансформаторным заводом.

На эту экспериментальную установку было возложено добавочное снабжение током интенсифицированных серий электролиза, увеличенную мощность которых не в состоянии покрыть без ущерба для резервирования находящиеся в эксплуатации моторгенераторы мощностью 10 500 kW каждый. При номинальной силе тока выпрямителя в 5000 A, параллельно работающие выпрямитель и моторгенератор² могут дать на серию 30 \div 31 kA вместо 25 \div 26 kA без выпрямителя, при среднем напряжении 400 V. Принципиальная схема питания серии от параллельно работающих моторгенератора и ртутного выпрямителя дана на рис. 1.

¹ Подробное описание этой подстанции дано в журнале «Электричество» № 5, 1935.

Каждый агрегат имеет четыре генератора мощностью 2275 kW при 350/500 V.

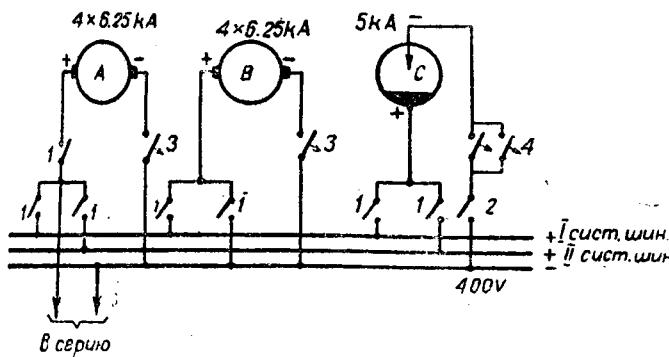


Рис. 1

А и В соответственно — мотор-генераторы: обслуживающий серию ванн и резервный, С — выпрямитель (может работать параллельно с генераторами); 1, 2 — разъединители, 3 — автоматы, 4 — быстродействующие выключатели

примитивную подстанцию для питания новой серии ванн на 50 кА.

Схемы. Выпрямители со своей аппаратурой размещены в вентиляционных помещениях готового уже здания преобразовательной подстанции.

Выпрямитель питается с шин 6-kV фидерной подстанции завода, непосредственно примыкающей к понизительно-транзитной подстанции А системы Днепроэнерго, на которой установлены трансформаторные группы мощностью 30 MVA каждая, 154/6 kV. Принципиальная схема коммутации одного РВ-70 показана на рис. 2. Для повышения вероятности отключения трансформатора от сети во время обратных зажиганий предусмотрены два последовательно соединенных масляники типа ВМ-22, отключающихся от своей защиты. Масляники, реактор и измерительные трансформаторы расположены в камерах фидерной подстанции. Ячейка кабельных разъединителей соединяется с открытой частью установки через сборку шин, где установлены трансформаторы тока для регулятора тока. На открытой части (рис. 3), смонтированной непосредственно у стены вентиляционного помещения, установлено следующее оборудование:

1. Автотрансформатор с проходящей мощностью в 6600—5100—4670 kVA для грубого регулирования выпрямленного напряжения (без нагрузки); на его анцапфах можно получить напряжения — 6850, 6300, 5280 и 4840 V при напряжении сети 6,3 kV.

2. Главный трансформатор типа ТМР-7500/6; первичное напряжение 6300 V — 5%. Первичная обмотка может быть соединена в треугольник или звезду; вторичная — сдвоенная шестифазная несвязанная система с трехфазной разделяющей катушкой. При включении на треугольник вторичное напряжение равно 940 V; выпрямленное напряжение — 775 V; мощность — 5050 kW. При включении на звезду — соответственно: 543 V; 425 V; 3180 kW. Вес выемной части — 11 t; масла — 9,3 t; полный вес — 27,5 t.

3. Формовочный трансформатор.

4. Разделяющая трехфазная катушка мощностью 2720 kVA; 100 Hz; 725 V.

В закрытой части подстанции установлены выпрямитель, хозяйство собственных нужд, два параллельных быстродействующих автомата и реактор в цепи выпрямленного тока на 0,2 mH. Выпрямленное напряжение 400 V (трансформатор

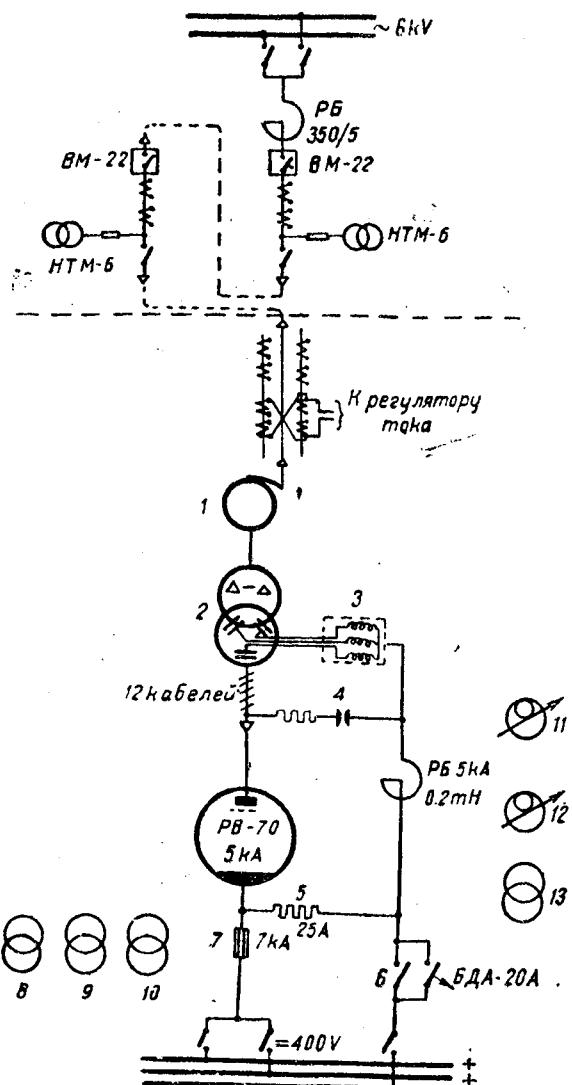


Рис. 2. Принципиальная схема одного выпрямителя

1 — автотрансформатор, 2 — главный трансформатор, 3 — катушка Кюблера, 4 — разрядник, 5 — балластное сопротивление, 6 — автоматы, 7 — шунты, 8, 9 и 10 — трансформаторы возбуждения форвакуумного и ртутного насосов, 11, 12 — фазорегуляторы ручной и автоматический, 13 — сеточный трансформатор

включен на звезду) или 800 V (при треугольнике). Выпрямитель 12-анодный, подвод тока к анодам осуществлен сверху двенадцатью сдвоен-

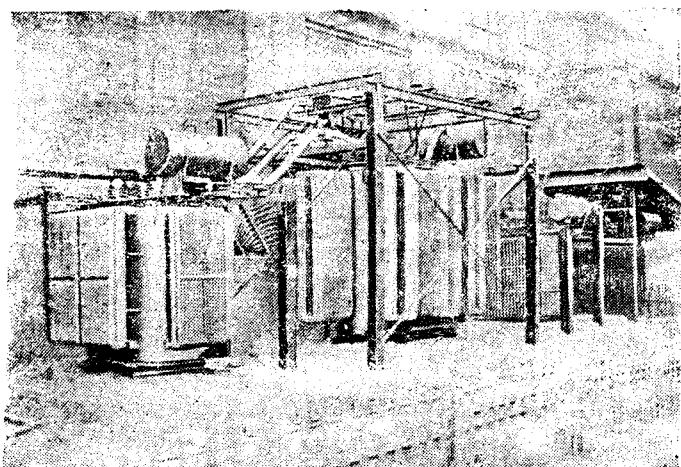


Рис. 3. Открытая часть установки

ными кабелями марки ПР-240. Для сеточного регулирования предусмотрены фазорегуляторы автоматического и ручного управления, сеточный трансформатор и подсобный трансформатор для схемы регулирования. Для срезывания пика Юблера смонтировано также балластное сопротивление на 25 А. Схема подключения выпрямителя на стороне постоянного тока показана на рис. 1. Выпрямитель посредством разъединителей 1 и 2 может быть подсоединен к любой плюсовой шине и к общему минусу распределительного устройства преобразовательной подстанции. Иначе говоря, он может работать параллельно с любым моторгенератором на любую серию.

Для мощных ртутных выпрямителей особое значение имеет выбор схемы питания. Правильный выбор этой схемы облегчает работу самого выпрямителя, улучшает использование трансформатора и сглаживает пульсации. Известно, что чем больше мощность ртутно-выпрямительной установки по сравнению с мощностью центральной станции, тем резче оказывается паразитическое влияние гармоник тока, создаваемых выпрямителями на генераторы.

В условиях ДАЗ эта проблема решается так. Хотя гидрогенераторы станции не имеют демпферных обмоток, влияние гармоник, вызываемых первыми тремя выпрямителями, можно не принимать в расчет потому, что при работе на 400 В суммарная мощность их не будет превышать 6 МВт, т. е. около 3% мощности генераторов, работающих на секцию Днепрокомбината (три машины). Даже если считать, что принятая схема трансформаторов (см. выше), являясь по существу шестифазной системой для внешней сети, сама по себе неприемлема (что весьма еще спорно) для гидрогенераторов ДГЭС, — при таком соотношении мощностей вредное действие гармоник, очевидно, будет мизерным. Однако такая схема, значительно облегчая работу выпрямителя (одно-

временно горят шесть анодов), понижает степень использования, усложняет конструкцию и ослабляет механическую прочность трансформатора.

Учитывая весь этот комплекс вопросов, с постоянной ртутно-выпрямительной подстанцией принята такая схема питания: треугольник — обратные звезды с двухфазной разделяющей втушкой и анодными делителями, причем один трансформатор предназначен для питания двух выпрямителей. Так как двенадцатифазная система более рекомендуема для гидрогенераторов типичных днепровских, предусмотрена такая группировка шестифазных агрегатов, которая делает их работу по отношению к сети переменного тока эквивалентной работе двенадцатифазных выпрямителей. Система зажигания и возбуждения РВ является дальнейшим развитием обычной схемы завода «Электросила» (рис. 4). Трансформатор возбуждения 2 и зажигания 4 магнитно независимы, с другом не связаны. Трехфазный трансформатор возбуждения имеет мощность 8,5 кВА при напряжении 380/220 В; схема соединений — треугольник или звезда на зигзаг. Вместо двух анодов возбуждения взято три анода, в цепь которых включены дроссели 3, увеличивающие реактивность трансформатора и способствующие устойчивому горению дуги возбуждения. Применен более усиленный двухполюсный контактор 5; во время работы он все время подтянут (контакты разомкнуты) и через него проходит ток в первом рядке 50 А. Все это устройство, за исключением конструкций за щитом управления.

Вакуумная система также стандартна. Уплотнения — резиновые с металлическими обжимками. Непрерывно работают два усиленных двухступенчатых ртутных насоса, питающиеся от специального изолировочного трансформатора. Форвакумный насос смонтирован прямо на корпусе выпрямителя и тоже питается от своего трансформатора. Эти трансформаторы, а также трансформаторы возбуждения и регулятора вынесены на отдельную площадку около щита управления.

Охлаждение корпуса выпрямителя выполнено по циркуляционному способу; однако есть возможность применения проточной системы. В проекте расход воды принимался равным 0,4 л/мин на 1 А выпрямленного тока при перепаде $\Delta t = 1^\circ$. При температуре входящей воды равной 20°, и отработанной — 40°, и при $I_g = 5000$ А расход был бы равен 100 л/мин. Практически, эксплоатация опытного РВ-70 эту цифру несколько повысила: на 1 А расходуется около 0,5 л/мин при перепаде 1°. Фактический же расход воды ничтожен, так как преимущественно используется циркуляционная система. Для начальных стадий работы выпрямителя предусмотрен предварительный подогрев воды в электрокотле. Охлаждение ртутных насосов производится через специальную магистраль.

Питание вспомогательной аппаратуры ртутно-выпрямительной установки обеспечивается одним фидером, идущим от шин 380 В распределительного устройства собственных нужд преобразовательной подстанции.

Около выпрямителя смонтирован трехпанельный щит управления. На одной панели размещены

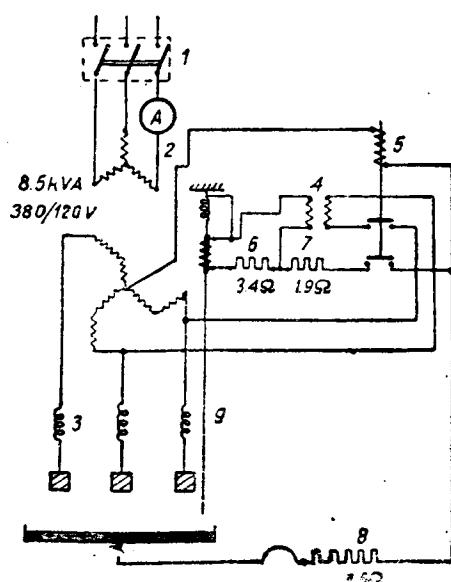


Рис. 4. Схема возбуждения и зажигания

1 — ру能力强, 2 — трансформатор возбуждения, 3 — дроссели, 4 — трансформатор зажигания, 5 — контактор, 6, 7 — ограничительные сопротивления, 8 — зигзаг зажигания

ны контакторы управления масляником и автоматами, измерительные приборы и сигнальные реле; на второй панели установлен регулятор тока со своими принадлежностями; третья панель представлена возбудительному устройству. Кроме того, на пульте мотор-генераторов имеются панели РВ, где расположены контакторы управления масляников и автоматов, ручного регулирования, измерительные приборы и реле. Операции с выпрямителем производятся с главного пульта. Последний связан с выпрямительной подстанцией внутренним телефоном и командаппаратом.

Конструкция выпрямителя и его наладка. По своему выполнению выпрямитель типа РВ-70 в основном ничем, кроме увеличенных габаритов, не отличается от последних выпусков завода «Электросила» (например РВ-20/30). Его высота — 3 м, диаметр корпуса — 2,57 м. Предельная для современных выпрямителей (в том числе и заграничных) величина выпрямленного тока, равная 5000 А, а также наличие сеток выдвинули ряд новых проблем и потребовали целесообразной модернизации существующих моделей главных частей выпрямителя.

Первоначально были установлены аноды типа А-21. Они были снабжены водяными радиаторами, но интенсивное охлаждение приводило к опасной конденсации ртути в тыльных частях анода; фланец сетки охлаждался ребристым радиатором. Кроме того, неудовлетворительной была конструкция ввода и двойных манжет. Все эти причины привели к полной замене анодов типа А-21 на новые аноды типа А-36.

Анод типа А-36 характеризуется следующими особенностями (рис. 5). Имеется фланец для подвода напряжения к сетке, который от остальных частей анода изолирован двумя изоляторами. В конце манжеты укреплена сетка, состоящая из ряда графитовых пластинок, поставленных на

ребро. Такая сетка лучше, чем конструкция в виде диска мясорубки. Выбор ребристой сетки обусловлен большим коэффициентом использования сечения манжеты, следовательно, более благоприятными условиями горения дуги. Подвод напряжения к сетке от ее фланца выполнен проводником, в нижней своей части подключен-

ным к коронке манжеты, которая электрически связана с ободом сетки. Головка анода графитовая без выемки внизу. Полный вес анода — около 120 кг. Аноды имеют ребристые радиаторы, но испытания показали, что они бесполезны, и аноды теперь работают вовсе без радиаторов, причем опасных перегревов не наблюдается.

Конструкция анода А-36 в части фланца сетки претерпела ряд изменений, непосредственно на месте во время наладки выпрямителя. На рис. 6 видна последовательность изменения модели А-36. Исследование имевших место при формовках аварий с анодами показало, что они происходили в результате пробоя с тыльной части анода на фланец сетки с перекрытием по внутреннему изолятору (рис. 7). Поэтому первоочередная задача заключалась в удалении фланца сетки от стержня анода, что и было сделано посредством перестановки изоляторов (рис. 6, б). Этого оказалось недостаточно. Малые внутренние диаметры нижнего изолятора и фланца сетки обусловили наличие незначительного расстояния между тылом анода и фланцем, усугубляющееся

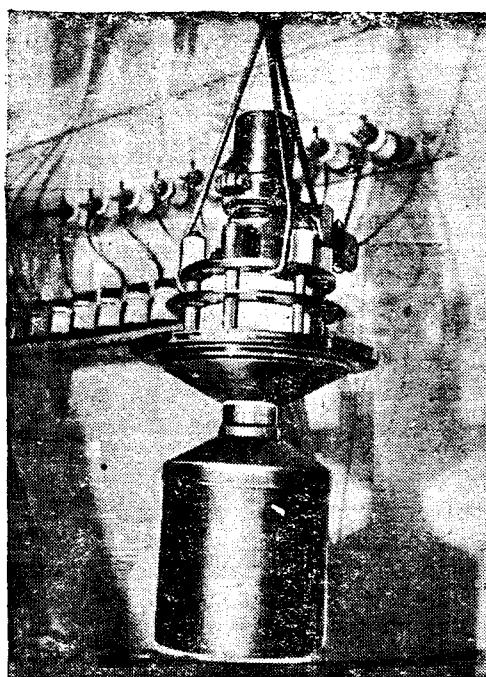


Рис. 5. Анод типа А-36 (соответствует рис. 6, а)

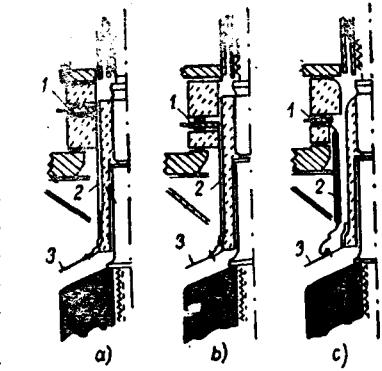


Рис. 6. Последовательность изменения конструкции анода А-36
1 — фланец сетки, 2 — годовод к сетке, 3 — коронка манжеты

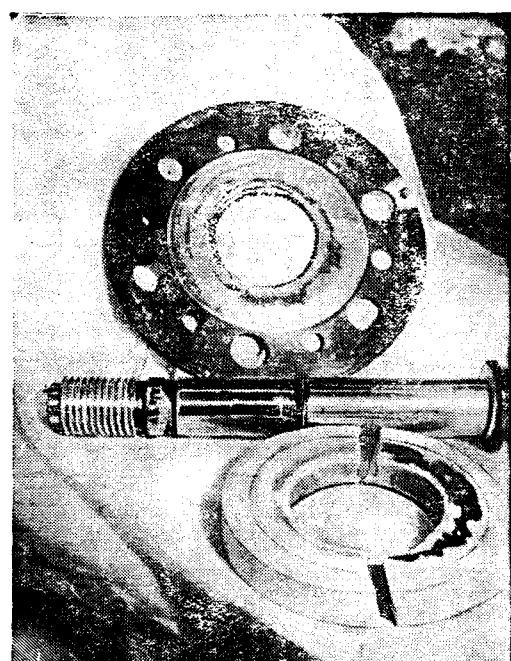


Рис. 7. Части анода после аварии

эксцентричностью дыры изолятора. Помимо собственно пробоя, весьма вероятной причиной аварий могло служить непосредственное замыкание через струйку ртути. Довольно большие лужицы конденсированной ртути могли скапливаться на торце верхнего изолятора, в особенности если внутренний диаметр уплотнения был велик. При стекании этой ртути вниз, струйка замыкалась на фланец, что было подтверждено специальными опытами. Поэтому были расточены нижний изолятор и фланец сетки и изолирован проводничок питания сетки. Переделанный таким образом анод показал хорошие результаты работы (рис. 6, с). Аноды возбуждения смонтированы на конденсационной камере, как обычно, а на плите корпуса, рядом с главными анодами.

Катод выпрямителя РВ-70 мало чем разнится от аналогичных конструкций завода. В середине донницы имеется углубление, предотвращающее удар иглы зажигания о металл. Количество ртути около 80 kg. В работе катода наблюдались замыкания сильных струек отфильтрованной ртути на корпус. Уменьшение диаметра отверстий промежуточного кольца сняло на-нет эти замыкания.

Следует отметить еще, что для лучшего охлаждения выпрямителя был предусмотрен пропуск воды через два змеевика, расположенные в конденсационной камере и в нижнем конце. Однако второй змеевик, являясь источником интенсивного охлаждения в районе дуги, привел к нежелатель-

ным результатам и его пришлось удалить, оставив только верхний змеевик:

Формовка производилась обычным способом на жидкостный реостат по схеме рис. 8. Главный трансформатор временными перемычками подключался к вторичной обмотке формовочного. Таким образом к главному трансформатору подводилось напряжение около 870 В, и тогда фазное формовочное напряжение равнялось 130 В, причем анцапфы автотрансформатора всегда были в нейтральном положении. Такая схема имела большую реактивность, порядка 55%, что затрудняло достижение большой нагрузки в конце формовочного периода. Приходилось вводить в реостат большие количества каустической соды. Перед каждой формовкой корпус выпрямителя подогревался водой, проходящей через электрокотел. Зажигание анодов контролировалось клещами Дитца. Во время формовки и испытаний регулярно производи-

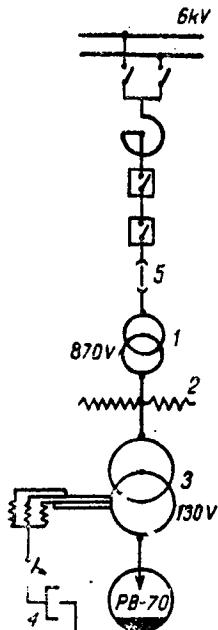


Рис. 8. Формовочная схема

лось осциллографирование падения в дуге, сен-
ных и анодных токов и др. На рис. 9 приводим
типичная осциллограмма падения в дуге; велич-
на падения достаточно удовлетворительная. В з-
висимости от различных условий применяли
различные режимы формовки и испытаний, оп-
исание которых не представляет общего интереса.

Защита и регулирование. Как уже указывалось, выпрямительный агрегат на стороне 6 kV имеет два последовательно включенных масляника, защищающих трансформатор от токов обратных зажиганий и перегрузок. Каждый масляник снажен максимально-мгновенной защитой, работающей от двух фаз, и перегрузочной с выдержкой времени, подключенной к третьей фазе. Главные и вспомогательные трансформаторы оборудованы газовыми реле.

Выбор защиты на стороне выпрямленного тока обусловливался, главным образом, требованиями безаварийной работы четырех, параллельно включенных с выпрямителем генераторов одного преобразователя. Предусматривалось, что во время обратных зажиганий мотор-генератор работает в режиме короткого замыкания, ток которого ограничивается весьма ничтожными сопротивлениями цепи машин и ошиновки. Ясно, что при этом ток короткого замыкания имеет направление, обратное нормальному. Быстрое отключение этого тока, недопущение достижения током своей максимальной величины является единственным способом обеспечения бесперебойной работы вращающихся агрегатов, включенных параллельно с выпрямителем при обратных зажиганиях последнего. Установленные на минусовых клеммах генераторов максимальные автоматы (рис. 1) непригодны для этой цели, так как они — небыстро действующие. Надежной защитой служат быстродействующие автоматы, установленные на минусе выпрямителя и включенные как обратные.

Вначале были смонтированы быстродействующие автоматы с Ш-образной магнитной системой завода «Электросила» типа БАОД-70/8. Их пришлось заменить на другие, так как контакты сильно перегревались.

Эксплуатируемые сейчас быстродействующие автоматы поставлены также заводом «Электросила». Выполнены автоматы по известной конструкции фирмы GE (тип JR), у них сдвоенные контакты, усиленная электромагнитная система, и они снабжены индуктивным щунтом. Автоматы (типа БДА 20 А) рассчитаны на 4000 А при 825 В. Ввиду того что рабочий ток выпрямителя равен 5000 А, в цепь включены два одинаковых автомата параллельно, причем они не блокированы на выключение. Управление их общее, оперативный ток — 220 А.

Так как автоматы обратные и должны отзываться на качественное изменение тока, то установка их взята минимально допустимой по конструктивным особенностям. Поэтому автоматы отрегулированы на быстро нарастающий обратный ток равный 800—1000 А каждый.

Как видно из рис. 2, в цепи минуса установлен бетонный реактор с индуктивностью 0,2 мН. Он предназначен для снижения скорости нарастания тока и срезывания пика этого тока. При общей индуктивности генераторов, шин и прочей аппа-



Рис. 9. Осциллограмма падения напряжения в дуге $e_d = 30 \text{ V}$; $I_d = 5 \text{ kA}$

ратуры, равной $0,2 \text{ mH}$, включение реактора даст удвоение суммарной индуктивности, что при малых омических сопротивлениях приводит к благоприятному отношению $\frac{R}{L}$. Ясно, что при таких условиях собственное время выключения быстродействующего автомата несколько возрастает, но ввиду малых выдержек это возрастание не существенно. Главное же в том, что при этом уменьшается максимальное значение тока к. з. до величины, не опасной для генераторов.

Во время наладки выпрямителя были произведены испытания быстродействующих автоматов в различных режимах. В таблице сведены результаты одного из испытаний автоматов при выключении ими тока короткого замыкания.

	Собственное время sec	Полное время sec	I_{\max}, A		
			БДА № 1	БДА № 2	Общий
С реактором . .	0,019	0,027	9 000	14 200	14 200
без реактора . .	0,0134	0,02	20 500	11 200	20 500

Осциллограммы показали, что вначале срабатывает один из автоматов, затем ток быстро нарастает и отключается второй. Одновременного отключения обоих выключателей нельзя было добиться, даже при равных выдержках.

Как известно, электролиз алюминия требует весьма широкого предела регулирования выпрямленного напряжения. Промежуточные значения номинального напряжения, необходимые при пуске, ремонте или отключении части ванн, могут быть получены при помощи переключения ацапф на главном трансформаторе или автотрансформаторе (без нагрузки). Но технологический процесс электролиза алюминия требует регулирования напряжения в пределах $100 \div 120\%$ от номинального для данного количества ванн в серии. Так как для данной установки принят режим постоянного напряжения, в тех же пределах приходится регулировать ток. Следует отметить, что при параллельной работе мотор-генератора

с выпрямителем первый с быстродействующим регулированием снимается, и автоматическому регулированию подвергается выпрямитель.

Исходя из этих обстоятельств, предусмотрено автоматическое регулирование выпрямительного тока сеточным управлением.

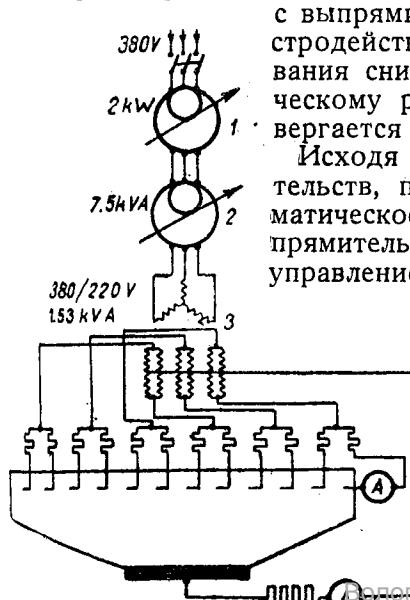


Рис. 10. Схема сеточного управления
1, 2 — фазорегуляторы ручной и с моторным приводом, 3 — сеточный трансформатор

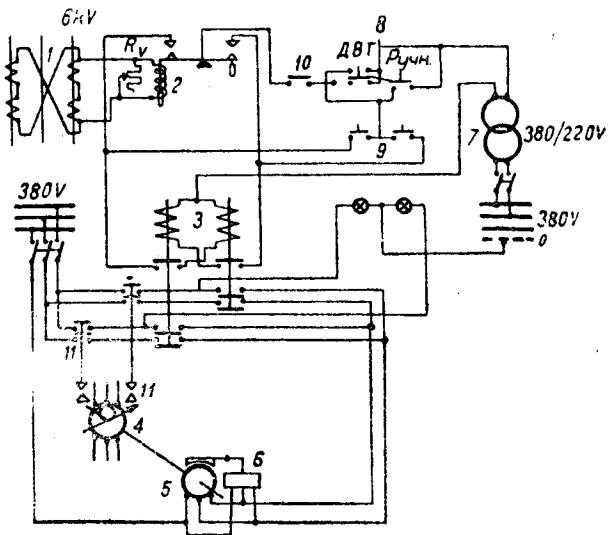


Рис. 11. Схема автоматического регулирования

1 — трансформаторы тока, 2 — регулятор, 3 — контакторы, 4 — фазорегулятор, 5 — сервомотор, 6 — электромагнитный тормоз, 7 — вспомогательный трансформатор, 8 — контактор перевода с ручного на автоматическое регулирование, 9 — контактор ручного управления, 10 — блок-контакты быстродействующего автомата, 11 — конечные выключатели

Сеточное управление выпрямителя выполнено по способу фазорегулирования. Общая схема питания сеток изображена на рис. 10. Сетки получают потенциал 220 V от сеточного трансформатора, который питается от сети 380 V через два последовательно включенные фазорегуляторы. Один из них, ручного управления, служит для предварительного регулирования и формовочных режимов. Второй — автоматический фазорегулятор с моторным приводом, работает под действием регулятора тока.

Принцип автоматического регулирования станет понятным из рассмотрения схемы рис. 11. При изменении нагрузки в серии трансформаторы тока 1 на стороне 6 kV подают соответствующий импульс в катушку 2 регулятора. При положении «автоматическое регулирование» контактора 8 на главном пульте контакты регулятора замыкают цепь одного из контакторов 3, катушки которых питаются от вспомогательного трансформатора 7 на 380/220 V. Эти контакторы в свою очередь замыкают цепь питания сервомотора 5, приводящего в движение ротор фазорегулятора 4, причем направление вращения сервомотора задается соответствующим контактором. Одновременно с подачей напряжения в сервомотор оживляется электромагнитный тормоз 6, освобождающий вал привода. Уставка тока регулируется сопротивлением R_v . Перед включением выпрямителя на параллельную работу с находящимся под нагрузкой мотор-генератором выпрямленное напряжение уравнивается с напряжением генераторов посредством операций с кнопками 9, чем достигается непосредственное воздействие на катушки 3, а следовательно, на сервомотор. При этом контактор 8 переводится в положение «ручное». Уравнивание напряжений облегчается тем, что пик Кюблера срезывается баластным сопротивлением.

Предварительные итоги эксплоатации. Результаты эксплоатации выпрямителя РВ-70 под про-

мышленной нагрузкой показали с несомненностью, что мощный выпрямитель с сеточным управлением нашей электропромышленностью освоен.

Параллельная работа с мотор-генератором никаких затруднений не вызывала, так как выпрямительный агрегат из-за повышенной реактивности схемы имеет достаточно круто падающую внешнюю характеристику. Распределение нагрузок устойчивое.

Небольшое количество обратных зажиганий, имевших место за это время, часть которых явилась следствием неправильного обслуживания, — никаких вредных последствий не оказывала на генераторы, что доказывает хорошую работу защиты. Выпрямитель также хорошо переносил обратные зажигания.

Считая, что в основном описываемая установка удовлетворительно разрешила поставленные пе-

ред нею задачи, отметим главные недостатки и упущения.

1. Схема и конструкция главного трансформатора требует упрощения и повышения надежности, желательны анодные реакторы.

2. Совершенно необходимо, чтобы автотрансформатор имел возможность переключения под нагрузкой.

3. Автоматическое регулирование, являясь не быстродействующим, при резких толчках нагрузки не успевает срабатывать, что приводит к отключению масляника от перегрузки.

Полное суждение о техно-экономических показателях данной установки можно иметь лишь на основании материалов приемочных испытаний. Однако можно утверждать, что работа выпрямителя типа РВ-70 при напряжении 400 В не дает того высокого экономического эффекта, который можно ожидать при напряжениях 600–800 В.

НОВЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

Способы опытного определения постоянной самоторможения синхронных гидрогенераторов

В. А. Толвинский
Ленинград

ПРИ испытании синхронного гидрогенератора на месте его установки в большинстве случаев единственным возможным методом определения его к. п. д. является метод самоторможения. Этот метод, — чрезвычайно изящный по идеи, — таит в себе при практическом применении в указанных условиях ряд трудностей; наибольшей из них является осуществление опытного определения постоянной самоторможения. Столкнувшись с этим вопросом впервые при приемочных испытаниях гидрогенераторов Волховской станции в мае 1927 г. [5], автор разработал способ определения постоянной самоторможения, основанный на использовании свойств кривой самоторможения короткозамкнутого возбужденного генератора. Проверить способ в реальных условиях приемочных испытаний удалось лишь в сентябре 1934 г. при приемочных испытаниях гидрогенераторов Днепровской гидростанции [8]. Результаты проверки автор изложил в докладе, представленном на сессии 1935 г. Международной конференции по сетям высокого напряжения [9]. В дальнейшем автор имел возможность проверить способ при приемочных испытаниях гидрогенераторов Нижневирской станции [10], при этом были разработаны и проверены еще другие способы определения постоянной самоторможения, основанные также на использовании кривых самоторможения. Изложению результатов работы по изысканию новых

способов опытного определения постоянной самоторможения гидрогенераторов и анализу ранее опубликованных способов и посвящена данная статья.

1. *Сущность метода самоторможения.* Метод самоторможения впервые был предложен М. Дергез в 1884 г. [1]. Метод основан на том, что если машину, вращающуюся с некоторой скоростью, предоставить самой себе, то имеющиеся в машине потери будут постепенно поглощать запасенную вращающуюся частью машины кинетическую энергию, вследствие чего скорость вращения машины будет постепенно убывать и тем быстрее, чем больше потери. Кривая, дающая в указанном опыте зависимость скорости вращения от времени, носит название *кривой самоторможения*.

Кинетическая энергия (в ватт-секундах) ротора машины, вращающейся со скоростью n об/мин,

$$W = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{60} \right)^2 (GD^2) n^2, \quad (1)$$

где GD^2 — маховой момент ротора в kgm^2 .

Механическая мощность (в ваттах) для любого момента времени, т. е. для любой точки кривой самоторможения, напишется так:

$$\frac{dW}{dt} = \left(\frac{\pi}{60} \right)^2 (GD^2) n \frac{dn}{dt}. \quad (2)$$

Приравнивая $\frac{dW}{dt} = Q$ имеющимся в машине в данный момент потерям (в ваттах) и вводя обозначения:

$$C = \left(\frac{\pi}{60}\right)^2 (GD^2) \text{ — постоянная самоторможения;}$$
(3)

$$\zeta = -n \frac{dn}{dt} \text{ — поднормаль кривой самоторможения (в данной ее точке),}$$
(4)

можем написать:

$$Q = C\zeta.$$
(5)

В выражении (4) при принятых выше обозначениях производная $\frac{dn}{dt}$ представляет изменение в секунду скорости вращения, выраженной в оборотах в минуту. Таким образом размерность ζ —

$$\left[\frac{(\text{об/мин})^2}{\text{сек.}} \right].$$

Если C известно, то по кривой самоторможения (рис. 1), полученной из опыта, можно для любой ее точки найти соответствующее значение ζ . Действительно, из рис. 1 для выбранной на кривой точки C имеем:

$$-\frac{dn}{dt} = \operatorname{tg} \delta = \overline{ab}.$$

Поднормаль

$$\zeta = -n \frac{dn}{dt} = n \operatorname{tg} \delta = \overline{ab}.$$

Следовательно,

$$C\zeta = C \times \overline{ab} = Q.$$

Здесь \overline{ab} нужно подставлять в масштабе, вычисляемом следующим образом. Пусть по оси ординат 1 см = y об/мин, а по оси абсцисс 1 см = x сек. Тогда, если $\overline{ab} = m$ см, то

$$\overline{ab} = m \left(\frac{y^2}{x} \right).$$
(6)

2. Применение метода самоторможения к определению к. п. д. синхронной машины. Нужно снять следующие три кривые самоторможения.

1) машины невозбужденной — выбег невозбужденный;

2) машины, возбужденной при разомкнутом статоре, — выбег возбужденный;

3) машины, возбужденной при замкнутом на коротко статоре, — выбег короткозамкнутый.

Исходя из приведенных выше соображений, можно для каждой из указанных кривых написать уравнение, аналогичное (5). Тогда получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= C\zeta_1; \\ Q_2 &= C\zeta_2; \\ Q_3 &= C\zeta_3. \end{aligned} \right\}$$
(7)

Здесь индексы 1, 2 и 3 соответствуют трем вышеопределенным кривым выбега.

Левые части этих уравнений можем представить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= Q_M; \\ Q_2 &= Q_M + Q_{Fe}; \\ Q_3 &= Q_M + Q_k. \end{aligned} \right\}$$
(8)

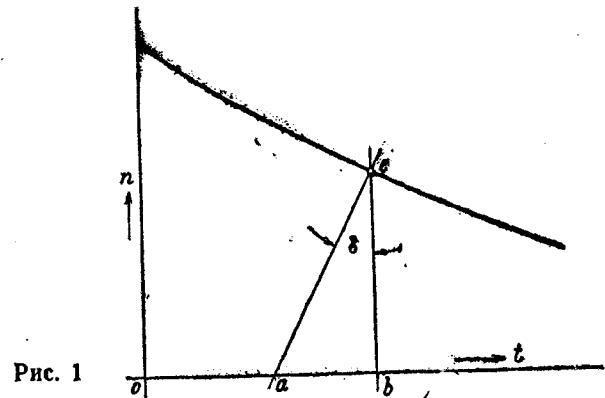


Рис. 1

Здесь:

Q_M — механические потери;

Q_{Fe} — потери в железе;

$$Q_k = Q_1 + Q_2 \text{ — потери короткого замыкания;}$$

Q_j — джоулевые потери, зависящие от прямоточного сопротивления обмотки статора;

Q_d — добавочные потери.

Таким образом вместо уравнения (7) имеем:

$$\left. \begin{aligned} C\zeta_1 &= Q_M; \\ C\zeta_2 &= Q_M + Q_{Fe}; \\ C\zeta_3 &= Q_M + Q_k. \end{aligned} \right\}$$
(9)

Интересуясь определением потерь и к. п. д. синхронной машины для номинального режима работы, следует при снятии кривой возбужденного выбега брать возбуждение, соответствующее при холостом ходе и номинальной скорости вращения n_N номинальному напряжению машины U_N ; при снятии же кривой короткозамкнутого выбега следует так возбудить машину, чтобы по статору проходил номинальный ток I_N . Вводя в уравнение (9) для значений поднормалей и потерь, соответствующих номинальной скорости вращения, дополнительный индекс N , можем переписать (8) в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} C\zeta_{1N} &= Q_{MN}; \\ C\zeta_{2N} &= Q_{MN} + Q_{FeN}; \\ C\zeta_{3N} &= Q_{MN} + Q_{kN}. \end{aligned} \right\}$$
(10)

Если C известно, то по уравнению (10) можно определить значения всех только что перечисленных потерь при номинальном режиме работы машины, а следовательно, и значение к. п. д., соответствующее этому режиму и называемое иногда номинальным к. п. д.

3. Обычный способ определения постоянной самоторможения синхронного генератора состоит в следующем. Генератор, отсоединеный от первичного двигателя, заставляют вращаться при номинальной скорости вращения n_N и номинальном напряжении U_N в качестве синхронного двигателя вхолостую. В этом режиме мощность Q_0 , подводимая к статору машины, тратится на покрытие следующих потерь: 1) $Q_{MN} + Q_{FeN}$ — потери механические и потери в железе при номи-

¹ Термин прямоточное сопротивление применен вместо часто применяемого неудачного термина «омическое»; это — сопротивление постоянному току (см. СЭТ, т. V, отд. 34 В, § 307).

нальной скорости вращения и номинальном напряжении; 2) Q_{k0} — потери к. з., имеющиеся во время опыта холостого хода при номинальной скорости вращения и токе, проходящем по статору в опыте холостого хода.

Регулируя надлежащим образом возбуждение испытуемой машины, вращающейся синхронным двигателем вхолостую, можно добиться значения $\cos \varphi$, близкого к единице, при котором ток статора I_0 в режиме холостого хода будет в процентном отношении к номинальному току статора I_N столь незначительным, что потерями Q_{k0} можно пренебречь. Тогда можно положить:

$$Q_0 \approx Q_{MN} + Q_{FeN}.$$

Подставляя определенное в этом опыте значение Q_0 во второе из уравнений (10) и пользуясь кривой возбужденного выбега, согласно указаниям, приведенным выше, можно найти:

$$C = \frac{Q_0}{\zeta_{2N}}. \quad (11)$$

Так обстоит дело с теоретической точки зрения. На практике, однако, при испытании гидрогенераторов на месте их установки, обнаруживается, что определение мощности Q_0 , потребляемой машиной в двигательном режиме холостого хода, невозможно из-за чрезвычайно быстрых и значительных колебаний стрелок ваттметров [5, 6, 8]. Обычно, питание испытуемой машины в режиме холостого хода двигателем производится от другой такой же машины гидростанции. Несколько значительны и нерегулярны в этом случае колебания стрелок ваттметров, можно видеть из приведенной на рис. 2 записи на ленте самопищущего ваттметра, который был включен при аналогичном опыте на Днепровской гидростанции. Колебания мощности, подводимой к статору машины, идущей в холостом двигательном режиме от другой такой же машины, наблюдаются как при автоматическом, так и ручном регулировании скорости вращения последней. В пояснение этого явления следует указать, что определяемые опытом потери Q_0 составляют крайне малую величину по отношению к номинальной мощности испытуемой машины, — порядка 1%, а потому при чрезвычайно малых угловых колебаниях ротора питающей машины легко возникают колебания подводимой к испытуемой машине мощности на 200—300% относительно среднего значения.

Чтобы уменьшить колебания стрелок ваттметров, была сделана при испытаниях генераторов Волховской гидростанции попытка питать испытуемую машину от главных генераторов станции, работающих полной своей мощностью на линию передачи. Эта попытка, однако, не дала желаемых результатов, и на глаз трудно было даже установить, имелось ли хотя бы незначительное успокоение стрелок. Это и понятно, так как условия сети не являются стационарными, и те небольшие колебания, которые не улавливаются по приборам полностью нагруженной машины, создают условия, достаточные для раскачивания машины, приключенной к сети в качестве идущего вхолостую синхронного двигателя.

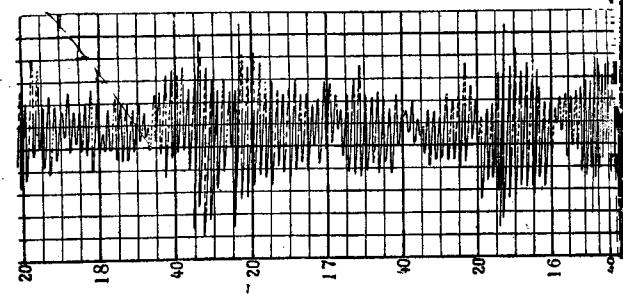


Рис. 2

4. *Определение постоянной самоторможения путем снятия четвертой кривой самоторможения.* Необходимость в пользовании опытом холостого хода при применении метода самоторможения вызвана тем, что в своей классической форме метод дает лишь три уравнения (7), а известных четыре: Q_{1N} , Q_{2N} , Q_{3N} и C . Чтобы избавиться от опыта холостого хода, Г. Н. Пров² [4] предложил снимать, кроме трех обычных кривых самоторможения, еще четвертую, а именно при нагрузке машины на реостат, — выбранной нагрузкой P_4 , при прохождении машины через номинальную скорость должна быть того же порядка, что и потери; в противном случае точность опыта пострадает.

Во время снятия четвертой кривой самоторможения приходится вести наблюдения не только за изменением во времени скорости вращения машины и за показаниями вольтметра, амперметра и ваттметра, включенных в цепь статора испытуемой машины. Если в опыте при прохождении машины через ее номинальное значение n_N напряжение номинальное, то уравнение четвертой кривой для точки n_N напишется в виде

$$C_{4N} = Q_{MN} + Q_{FeN} + \alpha^2 Q_{kN} + P_4.$$

Здесь α обозначает отношение значения тока статора в опыте нагруженного выбега к номинальному значению тока статора I_N :

$$\alpha = I_4/I_N.$$

Этот способ избавиться от необходимости производить для определения C опыт холостого хода чрезвычайно остроумен, но он, к сожалению, не всегда осуществим, так как требует наличия соответствующего реостата. Между тем при пуске крупных гидростанций, как показал опыт пуска Днепровской гидростанции, можно обойтись без конструирования специальных реостатов, применяемых обычно для налаживания работы гидротурбин. Строить же реостат специально для указанного опыта, конечно, нерационально.

В статье С. Б. Юдицкого [7] описывается вид изменения этого способа, осуществленное в предложении В. В. Енько при испытании турбогенератора на одной из районных электрических станций. Видоизменение способа состояло в том, что нагрузка для получения четвертого уравнения выбега была осуществлена не реостатом,

² Первые наименования возможность была указана Н. Cotton [2].

помощью повышающего трансформатора, непосредственно соединенного с испытуемым турбогенератором. При этом выбег с нагрузкой был сделан в двух вариантах; в первом случае повышающий трансформатор был включен вхолостую, а следовательно, нагрузку составляли потери в железе трансформатора, во втором — трансформатор был замкнут на стороне высшего напряжения накоротко, вследствие чего нагрузка получалась за счет потерь к. з. трансформатора.

Предложение В. В. Енько может быть, конечно, использовано при наличии соответствующих условий, и при испытании гидрогенераторов. При этом, однако, нужно указать следующее.

При тех соотношениях, которые имеются между потерями в железе и потерями в меди крупных трансформаторов, с одной стороны, и потерями в гидрогенераторе соответствующей мощности, с другой стороны, предпочтение принципиально следует отдать второму варианту нагрузки испытуемого гидрогенератора, а именно, при замкнутых накоротко вторичных зажимах трансформатора. Практически, однако, в обстановке испытаний гидрогенераторов на месте их установки проведение этого опыта сооружено с большими трудностями, а потому осуществление нагрузки посредством повышающего трансформатора лучше делать при холостом ходе трансформатора, мириясь с меньшей точностью этого опыта. Во всяком случае, оба предложенные В. В. Енько способа нагрузки испытуемого синхронного генератора посредством повышающего трансформатора заслуживают полного внимания.

5. *Питание машины, испытуемой в двигательном режиме холостого хода, от гидрогенератора станционных нужд.* Вышеприведенные результаты опытов, проведенных на Волховской гидростанции, побудили попытаться уменьшить колебания стрелок ваттметров, питая испытуемую в холостом ходе машину от генератора такой номинальной мощности, по отношению к которой потери холостого хода испытуемой машины составляли бы значительный процент. Таким генератором может служить, если он имеется, гидрогенератор станционных нужд. Соответствующие опыты были проделаны на Днепровской и Нижнесвирской гидростанциях.

На Днепровской гидростанции с главными генераторами мощностью по 77 500 кВА (62 000 кВ при $\cos \varphi = 0,8$) гидрогенератор станционных нужд имеет мощность 3 000 кВА (2400 кВ при $\cos \varphi = 0,8$); на Нижнесвирской гидростанции мощность подвергавшихся испытанию главных генераторов — 30 000 кВА (24 000 кВ при $\cos \varphi = 0,8$), а мощность станционного гидрогенератора — 2200 кВА (1760 кВ при $\cos \varphi = 0,8$). С учетом потерь в трансформаторах (через посредство которых в обоих случаях происходило соединение статоров испытуемой и питающей машины) нагрузка станционного генератора (питающей машины) составляла в этих опытах на Днепровской гидростанции 37%, а на Нижнесвирской 25%. Опыт в обоих случаях дал положительные результаты. Правда, стрелки ваттметров колебались, но частота колебаний, характер их и амплитуда колебаний были таковы, что, проделав ряд отсчетов, можно было достаточно уверенно опреде-

лить Q_0 . Следует отметить, что в обоих случаях стационарные генераторы работали во время опытов на ручном регулировании и не несли никакой посторонней нагрузки.

6. *Применение счетчика электрической энергии.* При испытаниях гидрогенераторов Днепровской станции, когда осуществление обычного способа определения потерь холостого хода по ваттметрам, включенным в цепь статора, не удалось из-за частых и больших колебаний стрелок приборов, в цепь статора был включен по схеме Ариона счетчик электрической энергии фирмы GEC. Счетчик предварительно был тщательно проградуирован при тех значениях напряжения и тока, которые ожидались в опыте. Сначала после включения счетчика было произведено несколько определений времени за 200 оборотов диска счетчика затем за 20 и, наконец, за 10 оборотов диска. По всем этим измерениям получились совершенно тождественные результаты, которые при учете поправок к счетчику дали расхождение с опытами, описанными выше, меньше 1%. Опыт с применением счетчика энергии был повторен при испытаниях гидрогенераторов Нижнесвирской станции и дал также положительные результаты. Это дало нам возможность применить счетчик энергии для определения Q_0 в качестве единственного способа при испытаниях гидрогенераторов Средненивской станции мощностью по 18 750 кВА (15 000 кВ при $\cos \varphi = 0,8$), так как на этой гидростанции нет гидрогенераторов станционных нужд.

7. *Экстраполяция кривой самоторможения возбужденного короткозамкнутого генератора.* Для любой точки этой кривой можем написать третье уравнение (7):

$$Q_3 = C\zeta_3 = -Cn \frac{dn}{dt}.$$

Сумму потерь Q_3 , имеющихся в этом опыте, можно представить в виде двух слагаемых: 1) потери Q_n , изменяющихся в зависимости от n ; сюда относятся потери механические Q_M и добавочные Q_s (рис. 3, кривая 1), и 2) потери на Джоулем эффект Q_j от прямоточного сопротивления в замкнутой накоротко цепи статора генератора, которые в широких пределах изменения n остаются неизменными, если температура обмотки статора за время опыта остается практически постоянной.

Полагая, что и при скорости, бесконечно близкой к 0, потери $Q_j = \text{const}$ (рис. 3, кривая 2), получим, что суммарные потери Q_3 должны изменяться в зависимости от n по кривой, пересекающей ось ординат в точке, для которой $Q_3 = Q_j$.

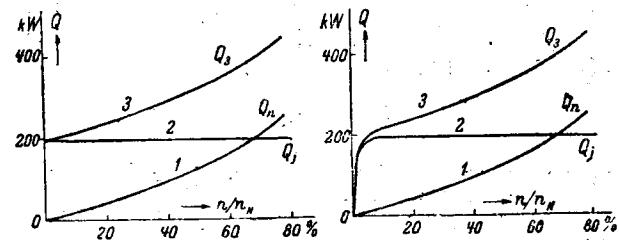


Рис. 3

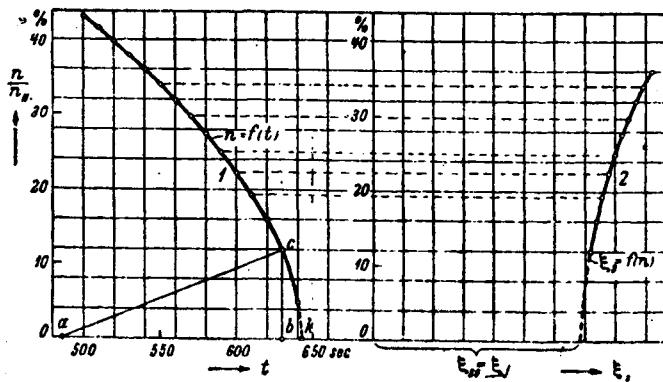


Рис. 5

В действительности же потери Q_j при скоростях вращения генератора, близким к 0, отступают от прямолинейного закона и при $n=0$ становятся равными 0. Это отступление от равенства $Q_j=\text{const}$ практически начинается при $n \approx 0,1 n_N$, вследствие чего изменение $Q_j=f(n)$ происходит в действительности по кривой, вид которой показан на рис. 4 под номером 2; в соответствии с этим и суммарные потери должны изменяться в зависимости от n по кривой, аналогичной кривой 3 рис. 4. Рассматривая рис. 4, несложно видеть, что если кривую 3 обрвать в точке, соответствующей $0,1 n_N$, и затем продолжить на глаз до пересечения с осью ординат в предположении, что потери Q_j остаются неизменными вплоть до значения $n=0$, то продолженная таким образом кривая должна пересечь ось ординат в точке, для которой $Q_3=Q_j$.

Потери Q_j легко определяются вычислением по току статора I , при котором производилось снятие кривой самоторможения возбужденного короткозамкнутого генератора, и прямоточному сопротивлению R_g короткозамкнутой цепи статора, определенному непосредственно после остановки машины в данном опыте. Имеем:

$$Q_j = 3I^2 R_g. \quad (13)$$

На основании изложенного можно следующим образом формулировать предлагаемый автором способ определения C по кривой самоторможения возбужденного короткозамкнутого гидрогенератора:

1) снять кривую самоторможения при $I_k = \text{const}$ до значения n , несколько меньшего $0,1 n_N$ (рис. 5, кривая 1);

2) построить по кривой $n=f(t)$ кривую поднормалей $\zeta_3=f(n)$ (рис. 5, кривая 2);

3) обрвать кривую $\zeta_3=f(n)$ при $n=0,1 n_N$ и продолжить ее на глаз до пересечения оси ζ в предположении, что потери $Q_j=\text{const}$ и при $n=0$;

4) полученное на оси ζ значение поднормали $\zeta_{30}=\zeta_j$ подставить в формулу:

$$C = Q_j / \zeta_j. \quad (14)$$

Вместо того чтобы строить $\zeta_3=f(n)$, можно построить $\zeta_3=f(t)$, как показано на рис. 6 (кривая 2). Обрывая эту кривую при n , соответствующем на том же рисунке по кривой 1 значению $n=0,1 n_N$, находим ζ_{30} путем экстраполяции

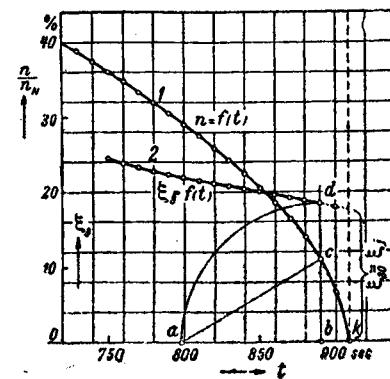


Рис. 6

до вертикали, проведенной через точку k , в которой кривая 1, т. е. $n=f(t)$ пересекает ось абсцисс.

Чтобы предлагаемый метод дал надежный результат, нужна большая тщательность как в постановке и проведении опыта самоторможения, так и в обработке кривой поднормалей $\zeta=f(n)$. Этим вопросам предполагается посвятить отдельную статью, здесь же автор считает нужным отметить основной недостаток предложенного способа, вытекающий из самого примененного принципа, а именно экстраполяции*. Всякая экстраполяция неизбежно является «гаданием», которое может дать хорошие и вполне надежные результаты только при соответствующем навыке. Это обстоятельство побудило автора искать других, более совершенных способов определения постоянной самоторможения гидрогенератора по кривым самоторможения. Такой способ приведется ниже.

8. Использование двух кривых самоторможения. а) Сняв две кривые самоторможения возбужденного короткозамкнутого гидрогенератора для двух разных значений тока I_a и I_b , находящихся в отношении

$$\alpha = \frac{I_a}{I_b}, \quad (15)$$

берем на каждой кривой две точки, соответствующие разным, но в обоих случаях одинаковым скоростям вращения n' и n'' ; при этом вторая меньшая скорость n'' должна быть в соответствии со сказанным выше больше $0,1 n_N$. Обозначим соотношение выбранных скоростей через

$$\beta = n' : n''. \quad (16)$$

Пользуясь этими и ранее введенными обозначениями, можем составить следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C'_{3a} &= Q'_M + Q'_{za} + Q_{ja} & \text{при } n = n' \\ C''_{3a} &= Q''_M + Q''_{za} + Q_{ja} & \text{при } n = n'' \\ C'_{3b} &= Q'_M + Q'_{zb} + Q_{jb} & \text{при токе } I_a \\ C''_{3b} &= Q''_M + Q''_{zb} + Q_{jb} & \text{при токе } I_b \end{aligned} \right\} \begin{aligned} & \text{при токе } I_a \\ & \text{статора } I_a \\ & \text{при токе } I_b \\ & \text{статора } I_b \end{aligned} \quad (17)$$

* В докладе, представленном в 1935 г. на конференцию по сетям высокого напряжения [9], мы отдали предпочтение построению, которое представлено на рис. 6. Ныне, после опыта применения на практике обоих построений, мы пришли к заключению, что построение, произведенное на рис. 6, более надежно.

Потери Q_j зависят при скоростях вращения $n > 0,1n_N$ только от тока статора, поэтому в системе уравнений (17) имеем два значения этих потерь — Q_{ja} и Q_{jb} , соответственно двум значениям тока статора I_a и I_b .

Потери Q_M зависят только от скорости вращения, поэтому в системе уравнений (17) имеем также только два значения этих потерь: Q'_M — при скорости n' и Q''_M — при скорости n'' .

Наконец, потери Q_z зависят и от тока статора и от скорости вращения, поэтому в систему уравнений (17) входят четыре значения Q_z :

$$\left. \begin{array}{l} Q'_{za}; Q''_{za}; \\ Q'_{zb}; Q''_{zb} \end{array} \right\} \quad (18)$$

В обозначениях поднормалей ζ , входящих в систему уравнений (17), индекс указывает, что речь идет о поднормали кривой самоторможения возбужденного короткозамкнутого гидрогенератора (см. выше), индексы a и b указывают на значения токов статора I_a и I_b , при которых сняты были кривые самоторможения, а штрихи (\cdot) и (\cdot') — на выбранные скорости вращения n' и n'' .

Чтобы написать связь между значениями потерь Q_z (18), нужно знать зависимость этих потерь от I и n . Зависимость от I давно установлена, а именно: потери Q_z изменяются так же, как и потери Q_j , пропорционально I^2 . Зависимость Q_z от n мало обследована; предположим первоначально, что она имеет степенной характер:

$$Q_z = Zn^k, \quad (19)$$

где Z — коэффициент пропорциональности, а k — некоторый, пока неизвестный, показатель.

Исходя из сказанного, можем написать:

$$\left. \begin{array}{l} Q'_{za}:Q'_{zb} = a^2; \quad Q'_{za}:Q''_{za} = \beta^k; \\ Q''_{za}:Q''_{zb} = a^2; \quad Q'_{zb}:Q''_{zb} = \beta^k; \\ Q'_{za} = Q'_{zb}a^2 = Q''_{zb}a^2\beta^k. \end{array} \right\} \quad (20)$$

Подставляя выражения (20) в (17), получаем:

$$\left. \begin{array}{l} C\zeta'_{3a} = Q'_{za} + Q''_{zb}a^2\beta^k + Q_{ja} \\ C\zeta''_{3a} = Q''_M + Q''_{zb}a^2 + Q_{ja} \\ C\zeta'_{3b} = Q'_M + Q''_{zb}\beta^k + Q_{jb} \\ C\zeta''_{3b} = Q''_M + Q''_{zb} + Q_{jb} \end{array} \right\} \quad (21)$$

В этой системе четырех уравнений неизвестными являются Q'_M , Q''_M , Q''_{zb} и C . Исключая первые три неизвестных, находим:

$$C = \frac{(Q_{ja} - Q_{jb})(\beta^k - 1)}{\beta^k(\zeta''_{3a} - \zeta''_{3b}) - (\zeta'_{3a} - \zeta'_{3b})}. \quad (22)$$

Рассматривая формулу (22), можно сделать следующие два вывода: во-первых, соотношение скоростей вращения β (16) следует брать возможно большим, чтобы ошибки при определении поднормалей возможно меньше влияли на разности их в уравнении (22), во-вторых, соотношение токов a (15) также следует брать возможно большим, чтобы ошибка в определении потерь Q при снятии кривых самоторможения возможно

меньше сказывалась на разности $Q_{ja} - Q_{jb}$, входящей в уравнение (22). Очевидно, что наилучшим образом этому второму условию можно удовлетворить, если за ток I_a , определяющий собой Q_{ja} , взять максимальное допустимое при снятии кривой самоторможения значение тока статора, а ток I_b положить равным нулю, т. е. второй выбег сделать при невозбужденном гидрогенераторе. При этих условиях в формуле (22) следует положить $Q_{jb} = 0$ и написать вместо Q_{ja} просто Q_j , так как второй выбег будет невозбужденным, кроме того, нужно у поднормалей изменить индексы $3a$ и $3b$, соответственно, на 3 и 1 . Формула для C (22) получит тогда следующий вид:

$$C = \frac{Q_j(\beta^k - 1)}{\beta^k(\zeta''_3 - \zeta''_1) - (\zeta'_3 - \zeta'_1)}. \quad (23)$$

Для нахождения по этой формуле постоянной самоторможения C нужно знать показатель k при β , т. е. нужно знать зависимость потерь Q_z от скорости вращения n (19).

Насколько нам известно, в литературе опытные данные по этому вопросу имеются лишь в статье Johnson [3], посвященной испытанию гидрогенераторов Ниагарской гидростанции. Это побудило нас самостоятельно обследовать этот вопрос на материале испытаний ряда гидрогенераторов на гидростанциях Союза. Результаты⁴ этого исследования подтвердили мнение Johnson, а именно, что показатель k в формуле (19) для Q_z можно принять равным единице:

$$Q_z = Zn. \quad (24)$$

Таким образом формулу для C можно представить в следующем окончательном виде:

$$C = \frac{Q_j(\beta - 1)}{\beta(\zeta''_3 - \zeta''_1) - (\zeta'_3 - \zeta'_1)}. \quad (25)$$

Имея кривые самоторможения машины при невозбужденном и возбужденном короткозамкнутом состоянии, снятые в широком диапазоне скорости вращения, например от 25 до 110% номинальной скорости, можем взять ряд значений β , притом для разных n' , и вычислив по формуле (25) ряд значений C , найти затем его среднее значение.

Чтобы еще больше повысить точность результата, следует снять кривую самоторможения невозбужденной машины 2–3 раза и пользоваться для разных n значениями ζ_1 , вычисленными как средние для всех снятых кривых невозбужденной машины; кроме того, следует снять 2–3 кривые самоторможения возбужденной короткозамкнутой машины, при разных токах статора, т. е. при разных Q_j . Это даст возможность, комбинируя каждую из снятых кривых короткозамкнутого выбега со средней кривой невозбужденного выбега найти несколько средних значений C и принять за истинное значение C среднее из вышеуказанных средних значений.

Предлагаемый новый способ определения C , основанный на использовании двух кривых само-

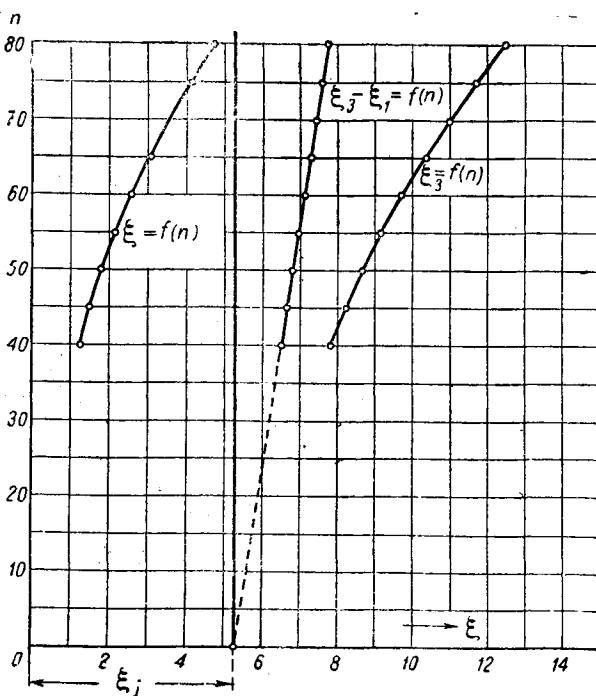


Рис. 7

торможения гидрогенератора и требующий ряда вычислений, может быть видоизменен следующим образом.

Строим кривые поднормалей возбужденного короткозамкнутого и невозбужденного выбегов: $\zeta_3 = f(n)$ и $\zeta_1 = f(n)$, и затем разность этих кривых (рис. 7):

$$\zeta_3 - \zeta_1 = f(n). \quad (26)$$

Эта разность должна представлять собой сумму поднормалей, определяющих собой потери Q_j и Q_z , т. е. вместо уравнения (26) можно написать:

$$\zeta_3 + \zeta_z = f(n). \quad (27)$$

Так как поднормаль ζ_j не зависит от n , а ζ_z , как упомянуто выше, пропорциональна первой степени n , то зависимость (27) должна представлять собой прямую линию, пересечение которой с осью ординат должно дать ζ_j . Зная же ζ_j , можем воспользоваться формулой (14) и определить C :

$$C = \frac{Q_j}{\zeta_j}.$$

Этот способ определения C можно рассматривать как уточнение ранее предложенного нами экстраполяционного графо-аналитического способа определения C по одной кривой самоторможения возбужденного короткозамкнутого гидрогенератора. Так как экстраполяция прямой линии может быть выполнена достаточно точно, то предлагаемое новое графо-аналитическое определение C нужно признать вполне надежным. Его следует даже предпочесть определению C как среднего значения из ряда вычислений по формуле (25), так как при графическом определении C выпадающие точки, не ложащиеся на прямую (27), сами собой отпадают, не искажая результата, в то время как при нахождении C как среднего зна-

чения из ряда определений по формуле (25) точки не отсеиваются. Отметим, кстати, что сопоставляя формулу (14) с (25), можно написать

$$\zeta_j = \frac{\beta (\zeta_3'' - \zeta_1'') - (\zeta_3' - \zeta_1')}{\beta - 1}.$$

Эта формула есть, очевидно, не что иное, как аналитическое определение начальной ординаты прямой (26), проведенной через две точки, координаты которых, соответственно, равны:

- 1) n' ; $(\zeta_3' - \zeta_1')$;
- 2) n'' ; $(\zeta_3'' - \zeta_1'')$,

причем координаты n' и n'' находятся в соотношении (16): $n':n'' = \beta$.

9. Выводы. 1. Зависимость добавочных потерь Q_z синхронных гидрогенераторов от их скорости вращения может быть принята пропорциональной первой степени скорости вращения, что впервые в 1926 г. установил Johnson [3].

2. Пропорциональность добавочных потерь синхронных гидрогенераторов первой степени скорости вращения гидрогенераторов позволяет определять постоянную самоторможения C по двум кривым самоторможения: одной — снятой при в возбужденном, другой — при короткозамкнутом в возбужденном состоянии.

3. Определение постоянной самоторможения по двум кривым самоторможения может быть сделано либо аналитически по формуле (25), либо графо-аналитическим способом, а именно путем экстраполяции кривой разностей поднормалей упомянутых двух кривых самоторможения и постановки в формулу (14) найденного экстраполяцией значения поднормали, соответствующей прямоточным джоулемовым потерям короткозамкнутого выбега.

4. Для получения по предлагаемым способом опытного определения C надежных результатов необходимо соблюдать надлежащую тщательность как при проведении опытов самоторможения, так и при снятии кривых самоторможения и определения по ним поднормалей⁵.

5. Для применения графо-аналитического способа следует кривую короткозамкнутого выбега снимать до полной остановки машины, а кривую невозбужденного выбега — до наименьшей скорости, которая может быть допущена по соображениям сохранности подшипников.

Так как потери на джоулев эффект Q_j остаются неизменными почти до скорости вращения, равной 0,1 номинальной n_N , то с уменьшением скорости вращения тормозящий момент от тока статора возрастает, и машина останавливается в более короткий срок, чем при обычном в эксплуатации торможении посредством тормозов. Поэтому причине снятие кривой короткозамкнутого выбега до полной остановки машины при значениях тока статора, равных или больших номинального (а именно такие кривые желательны в вполне осуществимо). Тормозящие моменты при снятии кривой невозбужденного выбега убывают

⁵ Этим вопросам предполагается посвятить отдельную статью.

со скоростью вращения, поэтому продолжительность невозбужденного выбега обычно у крупных гидрогенераторов очень велика, и вращение при малых скоростях очень продолжительно. Хотя подшипники гидрогенераторов рассчитываются таким образом, чтобы при такой остановке⁶ они не страдали⁷, все же подвергать подшипники таким экспериментам, в особенности повторным, не следует. Нужно, однако, отметить, что кривая невозбужденного выбега при скоростях вращения, меньших 25% номинальной, и не нужна, так как при меньших скоростях изменяется характер зависимости потерь в подшипниках от скорости вращения. До скорости же, равной 25% номинальной снятие кривой невозбужденного выбега можно производить (при рационально устроенной и исправной смазке) без опасения за сохранность подшипников.

ЛИТЕРАТУРА (сокращенный список)

1. M. D e r g e z, Sur le lois du frottement. Comptes Rendus, t. 99, 1884, стр. 861.

⁶ В эксплуатации такая остановка может иметь место в случае порчи тормозов.

⁷ В технических условиях договора с GEC на гидрогенераторы для Днепровской гидростанции имелась соответствующая гарантия.

2. H. C o t t o n, Détermination des pertes des machines électriques par la méthode d'amortissement. RGE, t. 11, 1922, стр. 836. (Реферат статьи, помещенной в BEAMA, т. 10, февраль 1922, стр. 128.)

3. J. A. J o h n s o n, Retardation method of losses determination as applied to large Niagara Falls generators. Tr. A. I. E. E., 1926, стр. 747.

4. Г. Н. П е т р о в, Определение потерь в синхронных турбогенераторах большой мощности. „Электричество“ № 2, 1927, стр. 58.

5. В. А. Т о л в и н с к и й, А. Г. С т р о л м а н, Результаты испытания главных генераторов Волховской гидроэлектрической установки (VI ГЭС), изготовленных ленинградскими заводами „Электросила“. „Изв. Электротока“, 1929, № 6 (Приложение к журналу „Электричество“, 1929, № 12.)

6. D. E. B r a i n a r d, Field tests on 16667 kVA water-wheel—driven generators for the Rock Island development. GER, 1932, стр. 615.

7. С. Б. Ю д и ц к и й, Новый метод определения постоянной С посредством опыта выбега генератора при нагрузке на трансформатор. „Электричество“ № 20, 1934, стр. 30.

8. В. А. Т о л в и н с к и й, Опытное определение коэффициента полезного действия главных генераторов Днепровской государственной электрической станции им. В. И. Ленина. „Ленинская ДнепроГЭС“, 1935, № 3, стр. 9.

9. W. T o l w i n s k i, Une nouvelle méthode expérimentale de détermination de la constante de l'autofocinage des alternateurs à commande hydraulique.

10. В. А. Т о л в и н с к и й, Приемочные испытания главных генераторов Нижнесвирской государственной гидроэлектрической станции. Сборник „Свирьстрой“, 1936, № VIII, стр. 3.

Диаграмма токов индукционного двигателя с переменным индуктивным сопротивлением

Л. М. Пиотровский
Ленинград

КЛАССИЧЕСКАЯ круговая диаграмма индукционной машины основывается на ряде предположений, в частности на том, что параметры машины не зависят от нагрузки и что сталь машины не насыщена. Если отступления от этих предположений невелики, то диаграмма токов практически продолжает оставаться кругом. Но иногда эти отступления настолько велики, что ими нельзя пренебречь. В этих случаях круг токов приобретает характер некоторого геометрического места, имеющего в разных случаях различную форму.

В данной статье мы рассмотрим влияние переменного индуктивного сопротивления x_k в короткозамкнутых индукционных двигателях малой мощности, выполняемых обычно с закрытыми пазами на роторе. Наличие так называемого мостика в пазе ротора приводит к тому, что индуктивное сопротивление ротора x'_2 , а стало быть и всего двигателя x_k изменяются в зависимости от тока по закону некоторой кривой, спадающей по мере увеличения тока сначала быстро, а затем медленнее. Чтобы выяснить характер кривой $x_k = f(I_k)$, где I_k — ток к. з., были обработаны опытные данные испытания 12 двигателей типа МТ6 (1-2-3) и МТ-7 (1-2-3) завода ХЭТЗ. Мощности двигателей находятся в пределах от 5,25 до 23,75 kW напряжения во всех случаях 380/220 V, скорости от 1500 до 750 об/мин. Чтобы иметь возможность сравнить между собою индуктивные сопротивления разных двигателей, мы приняли $x_k = 1$ при $I_k = I_N$. Кривые $x_k = f(I_k)$ приведены на рис. 1. Верхняя и нижняя кривые, проведенные тонкими сплошными линиями, показывают пределы, в которых находится x_k , а жирная линия дает среднее его значение. Среднюю кривую можно считать типичной для двигателей с закрытыми пазами ротора. По форме она напоминает гиперболу; простейший анализ показывает, что в пределах от $I_k = 5,7$ до $I_k = 1$ среднюю кривую можно упростить, считая ее гиперболой $x_k = 0,6 + \frac{0,46}{I_k}$.

разить с достаточной точностью уравнением:

$$x_k = 0,6 + \frac{0,46}{I_k} \quad (1)$$

Для сравнения кривая, полученная путем расчета по формуле (1), показана на рис. 1 прерывистой линией. Легко убедиться в том, что в указанных пределах обе кривые хорошо совпадают друг с другом. При $I_k < 1$ опытная кривая проходит ниже расчетной. Некоторые опыты заставляют даже думать, что при очень малых токах значения x_k начинают уменьшаться вместе с током, т. е. изменяется самий характер кривой $x_k = f(I_k)$. Но при работе двигателя небольшим токам соответствуют небольшие скольжения; в этом случае

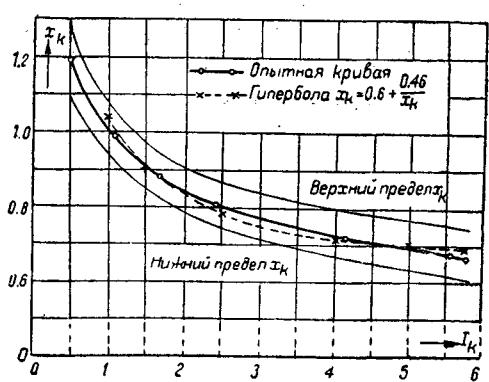


Рис. 1. Кривые $x_k = f(I_k)$ для серии двигателей МТ завода ХЭТЗ

главную роль играет активное сопротивление ротора $\frac{r_2}{s}$, и то или иное значение x_k имеет второстепенное значение. Поэтому мы будем считать основным законом кривой $x_k = f(I_k)$ закон гиперболы, внося в него на верхних участках кривой соответствующие корректировки.

При изучении той новой формы, которую приобретает круг токов в двигателях с переменным индуктивным сопротивлением, мы будем исходить из упрощенной эквивалентной схемы рис. 2. Здесь r_1 и $\frac{r_2}{s}$ — активные сопротивления обмоток статора и ротора, причем r_1 и r'_2 считаются постоянными величинами, x_{1c} и x_{2c} — постоянные составляющие индуктивных сопротивлений статора и ротора и x_v — сумма переменных составляющих тех же сопротивлений. Последнюю величину можно выразить в виде

$$x_v = \frac{E_v}{I_2},$$

где E_v — некоторая постоянная, имеющая размерность э. д. с. Таким образом

$$x_k = x_{1c} + x_{2c} + x_v = x_{kc} + \frac{r_v}{I_2}. \quad (2)$$

Тогда уравнение э. д. с. напишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= I_2' \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right) + j \cdot I_2' \cdot x_{kc} + j \cdot I_2' \cdot \frac{E_v}{I_2} = \\ &= I_2' \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right) + j \cdot I_2' \cdot x_{kc} + j \cdot \dot{E}_v [I_2'] \end{aligned}$$

или

$$\dot{U}_1 - j \cdot \dot{E}_v [I_2'] = I_2' \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right) + j \cdot I_2' \cdot x_{kc}. \quad (3)$$

При таком преобразовании скаляр E_v приобретает характер вектора, имеющего, как мы уже указывали раньше, размерность э. д. с., но направленного в положительную сторону вектора тока I_2' . Имея это в виду, мы будем в дальнейшем опускать при векторе E_v знак $[I_2']$.

Так как вектор \dot{E}_v имеет направление тока, сумма $\dot{U}_1 - j \cdot \dot{E}_v$ представляет переменную величину. Таким образом мы можем рассматривать ток I_2' как ток в цепи с постоянными параметрами r_1 , r'_2 и x_{kc} , но с переменным напряжением на зажимах. Это и дает нам возможность построить вектор тока I_2' . Построение производится следующим образом. Задавшись масштабом для вольт, мы откладываем вектор $\dot{U}_1 - j \cdot \dot{E}_v = AB$ в положительном направлении оси ординат (рис. 3). Предположим, что нам дан угол φ_2 , на который ток I_2' отстает от напряжения \dot{U}_1 . В этом случае вектор $j \cdot \dot{E}_v = OB$ образует с вектором \dot{U}_1 угол $\frac{\pi}{2} - \varphi_2$. Очевидно, что вектор $OB = \dot{U}_1 - j \cdot \dot{E}_v$. Так как $E_v = \text{const}$, а угол φ_2 может изменяться в пределах от 0 до $\frac{\pi}{2}$, геометрическое место конца вектора AB , а стало

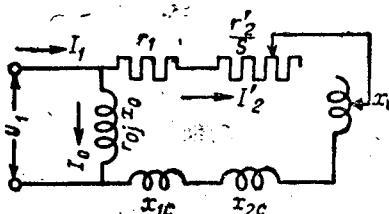


Рис. 2. Эквивалентная схема двигателя с переменными параметрами

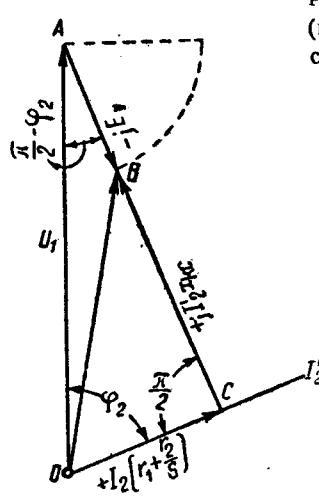


Рис. 3. Диаграмма э. д. с.

быть, и OB , есть окружность, описанная из точки A как центра радиусом, равным E_v .

Продолжим вектор AB до пересечения с направлением вектора тока I_2' в точке C . Тогда

$$OC = +I_2' \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right) \text{ и } CB = +j \cdot I_2' x_{kc},$$

т. е. получается обычный треугольник э. д. с., с тою только разницей, что реактивная составляющая напряжения сопоставлена постоянного слагаемого AB , идущего на преодоление переменного сопротивления x_v , и переменного слагаемого идущего на преодоление постоянного сопротивления E_v . Если каждую сторону треугольника напряжения разделить на x_{kc} , то получим треугольник токов. Повернем его в направлении вращения векторов и перейдем от вектор значений токов к их скалярам. Тогда получается прямоугольный треугольник OA_1C_1 (рис. 4), гипотенуза которого

$$OA_1 = \frac{U_1}{x_{kc}} = I_{2l},$$

а катет

$$A_1C_1 = \frac{E_v + I_2' x_{kc}}{x_{kc}} = \frac{E_v}{x_{kc}} + I_2'.$$

Если отложить от точки C_1 отрезок $C_1D_1 = \frac{E_v}{x_{kc}}$, то получим отрезок $A_1D_1 = I_{2l}$.

Точка C_1 — вершина прямоугольного треугольника и поэтому ее геометрическое место есть окружность, построенная на отрезке $OA_1 = I_{2l}$ как на диаметре.

Отсюда непосредственно вытекает правило построения вектора тока I_2' : а) на отрезке $OA_1 = \frac{U_1}{x_{kc}} = I_{2l}$ строим полуокружность; б) проводим луч под произвольным углом к оси ординат до пересечения с полуокружностью в точке C_1 и в) из отрезка A_1C_1 вычитаем отрезок $C_1D_1 = \frac{E_v}{x_{kc}} = \text{const}$, выраженный в масштабе токов. Тогда отрезок A_1D_1 дает нам искомый ток I_2' .

Если такое построение произвести достаточно число раз, то получим геометрическое место вектора тока I_2' в векторах D_1 , D_2 и т. д. (рис. 4).

Докажем, что такое геометрическое место не является окружностью круга, но близко к нему. Для этого мы покажем другой способ построения тока I_2' . В самом деле построим еще раз треугольник токов A_1C_1O (рис. 5). Из центра O_1 полуокружности A_1C_1O опишем дугу радиусом равным $\frac{E_v}{2x_{kc}}$, и проведем из O_1 прямую, параллельную A_1C_1 до пересечения с дугой в точке F_1 . Нетрудно доказать, что $A_1F_1 = F_1D_1$. Для этого проще всего снести прямую F_1D_1 параллельно самой себе на длину $\frac{E_v}{x_{kc}}$ по направлению A_1C_1 (или F_1O). Очевидно, что в этом случае точка D_1 совпадет с точкой C_1 , а точка F_1 придет в точку F_1' , приче

$$O_1F_1' = O_1F_1 = \frac{E_v}{2x_{kc}},$$

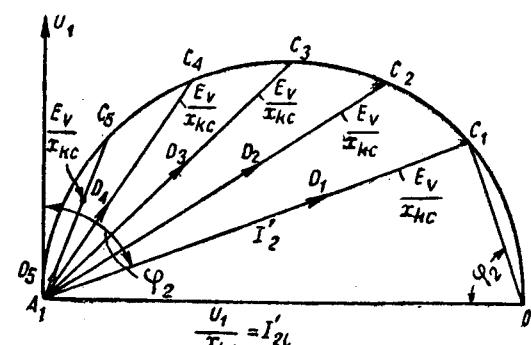


Рис. 4. Диаграмма токов

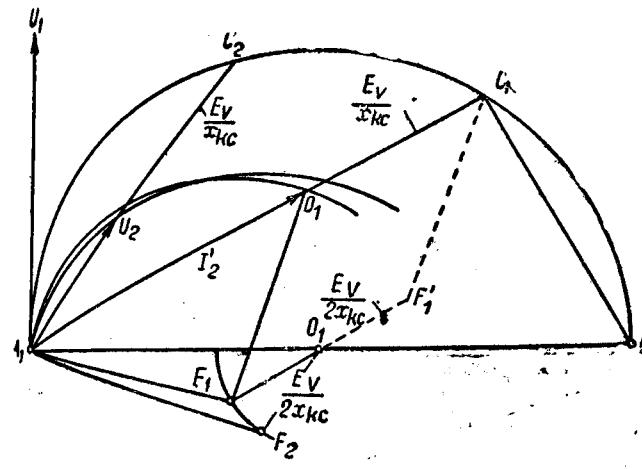


Рис. 5. Второй способ построения тока I_2

т. е. точки F_1 и F_1' расположатся симметрично относительно центра O_1 . Фигура $A_1F_1F_1'C_1$ представляет собою равнобокую трапецию.

Следовательно,

$$A_1 F_1 = F_1' C_1 = F_1 D.$$

Таким образом точку D_1 и, стало быть, отрезок $A_1D_1 = I_2'$ мы можем получить, если примем за центр точку F_1 и опишем круг радиусом, равным F_1A_1 . Это построение мы повторили для тока A_1D_1 , описав для этого другую окружность радиусом A_1F_2 из центра F_2 , лежащего на той же дуге, что и центр F_1 . Таким образом в двигателе с переменным индуктивным сопротивлением каждый ток I_2' лежит на своей окружности круга, имеющей свой особый радиус R и свой центр F , находящийся на дуге центров $F_1F_2\dots$

$$R_{\min} \approx \frac{U - E_v}{2x_{kc}} \text{ до } R_{\max} \approx \frac{U_1}{2x_{kc}} \left(\text{точно: } R_{\max} = \frac{U_1}{2x_{kc}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{E_k}{U_1} \right)^2} \right).$$

Характерно в этом построении то, что дуга центров лежит ниже оси абсцисс, в противоположность обычной тенденции поднимать центр круга токов над осью абсцисс.

Чтобы показать, что полученное нами геометрическое место токов близко к окружности, мы восстановим к средине вектора тока k з. A_1K нормаль (рис. 6); очевидно, что она будет касательной к дуге центров E .

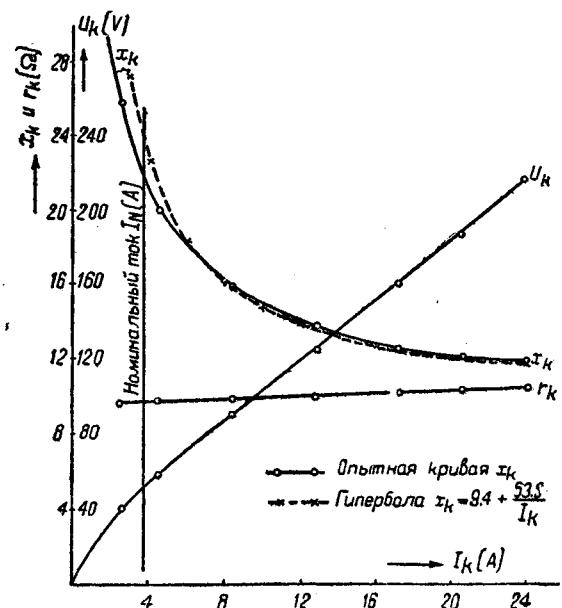


Рис. 7. Кривые U_k , r_k и $x_k = f(I_k)$ двигателя завода «Ревтруд» мощностью 1 kW, 380/220 V

Подберем на этой нормали точку G так, чтобы описанная из нее окружность радиусом, равным A_1G , проходила через одну из средних точек нашего геометрического места. Тогда все его точки налево от этой точки будут лежать внутри окружности, а направо — вне ее. Несмотря на то, что построение на рис. 6 сделано для относительно большого E_v ($E_v = 0.30U_1$), тем не менее действительная кривая почти совпадает с окружностью. Центр G можно или построить обычным путем, или, исходя из обычных для мелких двигателей соотношений между параметрами, принять, что точка G лежит ниже оси абсцисс на величину

$$GH \approx (0,30 \div 0,35) \cdot \frac{E_v}{x_{bc}}. \quad (4)$$

Теперь введем поправку на отступление кривой $x_{kc} = f(I_k)$ от закона гиперболы. Как мы видели выше (рис. 1), отступления наблюдаются при небольших токах, т. е. в частях диаграммы, ближайших к точке A_1 (рис. 6). Чтобы получить истинные значения x_k по формуле (2) или в частном случае (1), нужно, очевидно, уменьшать E_v . На диаграмме это соответствует уменьшению отрезка $\frac{E_v}{x_{kc}}$ между внешней и внутренней окружностями, и следовательно, увеличению токов I_2' . Если бы, например, для тока A_1D_4 э. д. с. E_v уменьшилась на одну треть, то точка D_4 перешла бы

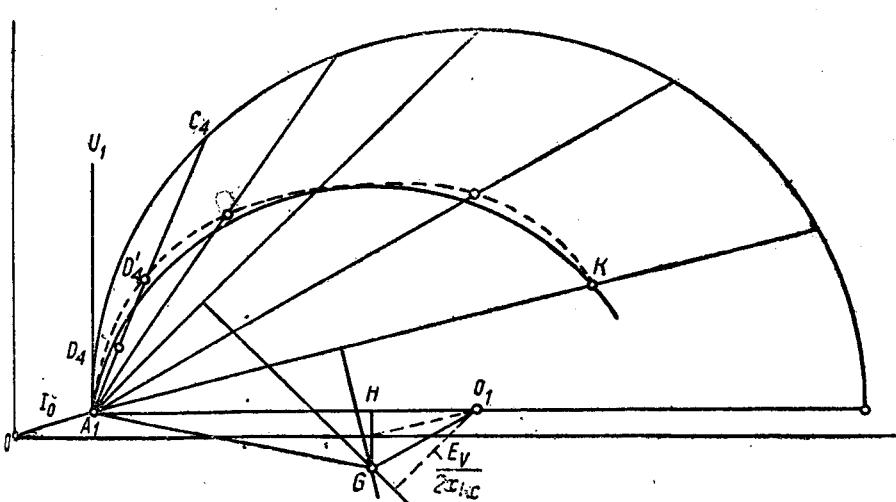


Рис. 6. Упрощенное построение диаграммы токов двигателя с переменными параметрами

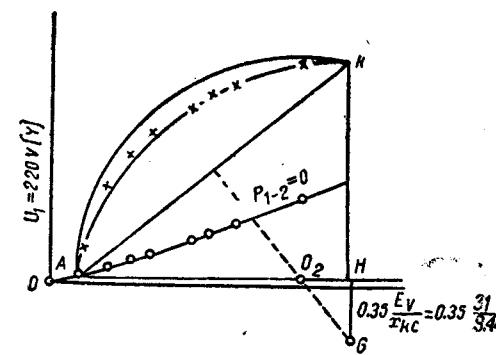


Рис. 8. Диаграмма токов двигателя ТАГ при $U_1 = 220$ В

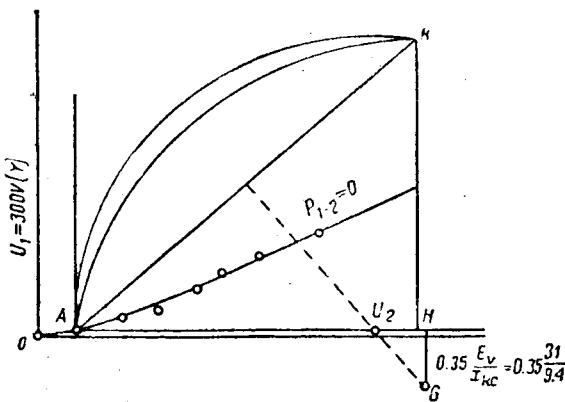


Рис. 9. Диаграмма токов двигателя ТАГ при $U_1 = 300$ В

E_v велико, то ряд точек в начальной части диаграммы выходит за внутренний круг токов, вследствие чего диаграмма в целом приобретает эллипсоидальный характер, что чаще всего и наблюдается. На рис. 6 мы показали такую примерную кривую прерывистой линией.

Чтобы получить ток в статоре I_1 , нужно только пристроить к данной диаграмме ток холостого хода I_0 , как это показано на рис. 6.

Считая, что геометрическое место тока в статоре есть окружность, нетрудно притти к выводу, что линия моментов остается прямой линией, которая строится обычным образом.

Для проверки всего изложенного был подробно исследован двигатель ТАГ 21/4 мощностью 1 kW, 380/220 V, 1500 об/мин завода „Ревтруд“. Кривые U_k , r_k и $x_k = f(I_k)$ этого двигателя показаны на рис. 7 (все величины выражены в обычных единицах). Кривая $x_{kc} = f(I_k)$ может быть представлена следующим уравнением:

$$x_k = 9,4 + \frac{53,5}{I_k}. \quad (5)$$

Следует заметить, что опыт к. з. мы произвели при соединении обмоток статора треугольником. При соединении звездой мы имели бы

$$x_k = 9,4 + \frac{30,9}{I_k}. \quad (6)$$

Двигатель был исследован при работе под нагрузкой и соединении обмоток статора звездой и различных линейных напряжениях, а именно: $U_1 = 220$; 300 и 380 V. Во всех случаях частота $f = 50$ Hz. Схема была собрана так, что позволяла производить все необходимые измерения практически при всех нагрузках от холостого хода до к. з. Производились измерения температуры обмотки статора (по методу сопротивления) после снятия одной или нескольких

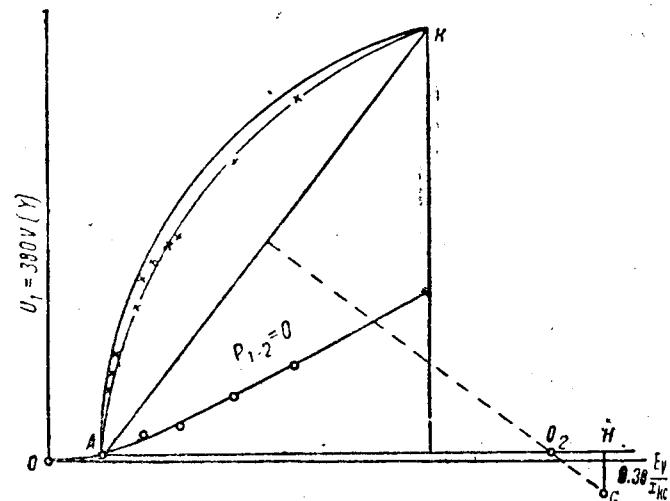


Рис. 10. Диаграмма двигателя ТАГ при $U_1 = 380$ В

точек, причем были приняты меры к тому, чтобы температура двигателя изменялась в возможно узких пределах.

Опытные точки и результаты построений показаны на диаграммах рис. 8, 9 и 10. Опытные точки изображены крестиками. Круговые диаграммы, построенные обычным путем — точкам холостого хода и к. з. A и K и центру O_2 , дают внутреннюю часть окружности. Круговые диаграммы с опущенным центром G показаны внутренними частями окружности. Очень легко заметить, насколько диаграммы с опущенным центром ближе отвечают опытным данным, чем диаграммы построенные обычным путем. Линия моментов $P_{1,2} = 0$ представляет собою кривую, слабо вогнутую в направлении оси абсцисс. Практически ее можно считать прямой.

В заключение сделаем два замечания. Первое относится к сопротивлению x_k . Оно принимается за постоянную величину, тогда как в действительности оно переменно. Для способа расчета такого именно действительного индуктивного сопротивления составляет первую задачу, которую следует считать нерешенной до сих пор.

Второе замечание имеет в виду диаграмму, построенную при $U_1 = 380$ V. Здесь обычная и предлагаемая диаграммы ближе подходят друг к другу. Это объясняется влиянием насыщения стали, которое начинает сказываться при нормальном напряжении. В настоящей статье влияние насыщения не рассматривается. Но в ближайшей статье мы покажем, что насыщение действует в противоположном направлении по сравнению с переменным x_k . Другими словами, увеличивая насыщение, мы можем в двигателе с переменным индуктивным сопротивлением получить геометрические места, совпадающие с обычной круговой диаграммой и даже выходящие за нее, — т. е. все происходит так, как будто центр непрерывно перемещается вверх по некоторой наклонной линии сначала до оси абсцисс, а затем над нею.

Схема магистрального электровоза с ионным преобразователем

Б. М. Шляпошников

Ленинградский Индустриальный институт

ТРЕБОВАНИЯ, предъявляемые к электрической схеме электровоза со стороны генерирующих станций, районных подстанций, линий передачи энергии, конструкции самого электровоза и рода установленных на нем двигателей, носят противоречивый и подчас даже трудно примиримый характер.

Этим обстоятельством объясняется тот факт, что как в СССР, так и в странах Западной Европы и Америки до сих пор еще продолжаются поиски наилучшего решения вопроса о выборе системы магистрального электровоза¹.

Безусловный интерес представляет электровоз однофазного тока стандартной частоты с установленным на нем ионным преобразователем и нормальными тяговыми двигателями постоянного тока.

Такая система должна сочетать положительные качества постоянного и однофазного токов и может иметь большое будущее². Однако осуществление ее зависит от возможности создать на данном уровне развития техники практически пригодную и экономически выгодную электрическую схему.

1. В настоящее время может быть осуществлена схема, показанная на рис. 1 и заключающаяся в следующем:

К пантографу подводится однофазный ток высокого напряжения. Рельсы используются в качестве второго провода. На электровозе устанавливается понижающий однофазный трансформатор 1, управляемый ионный преобразователь 2, дроссель, сглаживающий пульсации выпрямленного тока, нормальные тяговые двигатели постоянного тока 4 и сеточное управление 5. Пуск двигателей и изменение их скорости осуществляются плавным регулированием выпрямленного напряжения помочью сеток преобразователя.

Вторичная обмотка трансформатора 1 — двухступенчатая. Соответственно этому, аноды первой ступени $A_1 A_1$ обладают меньшим потенциалом, чем аноды второй — $A_2 A_2$. Нулевая точка вторичной обмотки трансформатора соединена с одним из анодов выпрямителя.

Благодаря известному воздействию сетки на дугу выпрямителя³ можно полностью запереть аноды одной ступени, и, изменяя момент зажигания анодов другой, регулировать выпрямленное напряжение от нуля до некоторого максимума, определяемого напряжением горящих анодов. В этом случае схема будет одноступенчатой. Соответствующая ей кривая выпрямленного напряжения показана на рис. 2, а.

Сеточное управление допускает осуществление также и двухступенчатого режима. В этом случае в течение одной и той же пульсации выпрямленного напряжения, длительность которой при однофазном двухполупериодном выпрямлении составляет 180° , — на протяжении некоторого угла β_1 горит анод низшей ступени A_1 , а затем благодаря изменению потенциала своей сетки анод высшей ступени A_2 также зажигается и, обладая более высоким напряжением, как бы перехватывает ток у анода A_1 (рис. 2, б и с). Вполне понятно, что анод A_2 горит в пределах угла $\beta_2 = 180^\circ - (\alpha + \beta_1)$, где α — угол, за время которого все фазовые аноды заперты. В период времени, соответствующего этому углу, выпрямленный ток, поддерживаемый электромагнитной энергией, за-

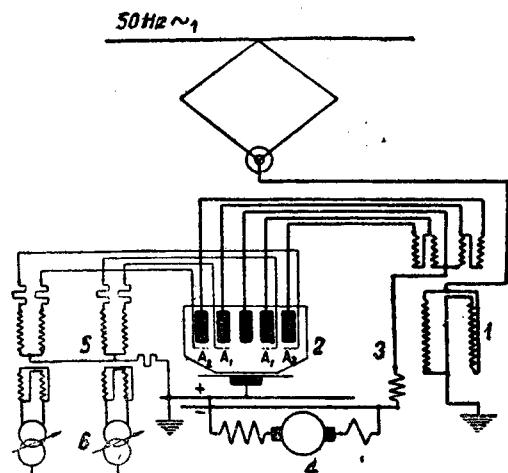


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема электровоза однофазно-постоянного тока

1 — однофазный двухступенчатый трансформатор, 2 — ртутный преобразователь с управляемыми сетками и нулевым анодом, 3 — дроссель, 4 — двигатель постоянного тока, 5 — сеточные трансформаторы, 6 — фазорегуляторы

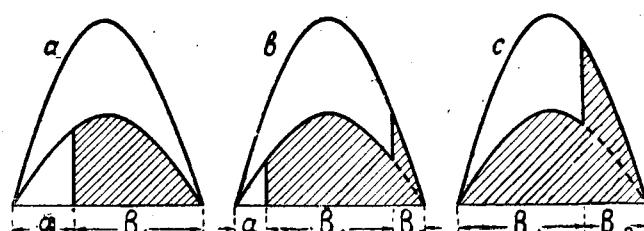


Рис. 2. Изменение кривой выпрямленного напряжения при регулировании ее постоянной составляющей

¹ M. Schenkel и I. Issendorff, S.-Z. 1933, стр 289; O. Michel, E. T. Z. № 38 и 39, 1936; Г. И. Бабат, «Электричество», № 10, 1935.

² А. Гильберт-Салинас, постоянный или однофазный ток. «La Traction Électrique», № 5, май 1931; перевод этой статьи помещен в Трудах Научно-исследовательского института электрификации железных дорог. Сборник «Выбор системы тока для электрификации железных дорог СССР», 1932, ОГИЗ — Гострансиздат.

³ Е. Кеги, ASEA № 22, 1931; К. А. Круг, «Электричество», № 15 и 16, 1933.

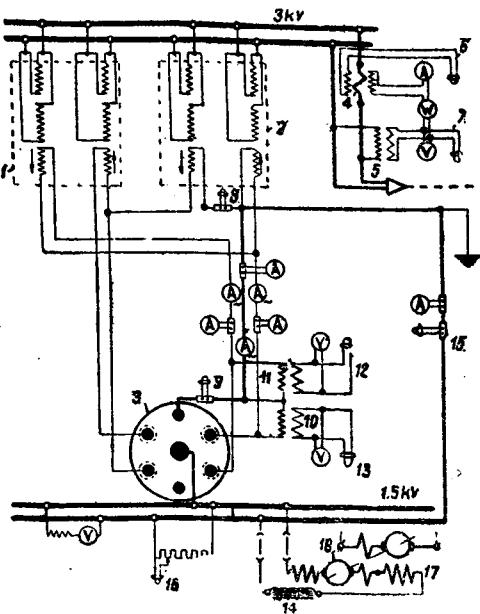


Рис. 3. Схема экспериментальной лабораторной установки

1—2 — трансформаторы однофазные по 1200 kVA, 3 — управляемый ртутный преобразователь с нулевым анодом, 4 — трансформатор тока, 5 — трансформатор напряжения, 6, 7, 8 и 9 — шлейфы, осциллографировавшие соответственно однофазный ток, напряжение его, ток фазовых и нулевого анодов, 10 и 11 — трансформаторы напряжения, 12 и 13 — шлейфы напряжения вторичной обмотки трансформатора, 14 — дроссель, 15 и 16 — шлейфы выпрямленного тока напряжения, 17 — генератор ДПЭ-340, 18 — двигатель ДПЭ-840

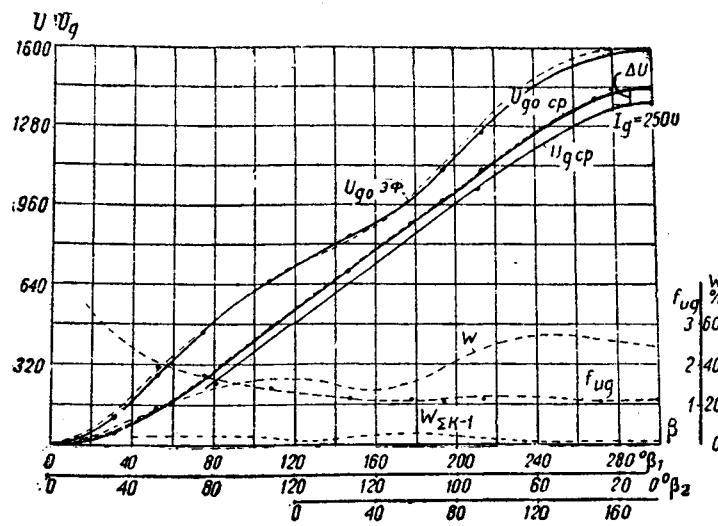


Рис. 4. Характеристики выпрямительного агрегата

последней в дросселе, замыкается через нулевой анод ⁴.

Все эти углы — α , β_1 и β_2 — задаются сеточным управлением, чем и достигается плавное регулирование выпрямленного напряжения.

Схема, подвергавшаяся исследованиям на стационарной установке в лаборатории, показана на рис. 3. Она состояла из двух однофазных трансформаторов 1, 2 по 1200 kVA каждый, ртутного выпрямителя в железном сосуде 3 с управляемыми сетками (тип РВ-10 завода «Электросила» с изготовленными в лаборатории управляемыми

анодами), дроссельных катушек 14 и моторгенераторного агрегата 17, 18, собранного из двух хомически связанных между собой и вполне идентичных типовых серийных двигателей постоянного тока завода «Динамо» типа ДПЭ-340.

Одна из этих машин работала в режиме двигателя, а вторая в режиме генератора. Нагрузкой служил водяной реостат. Обмотка главных полюсов генератора была включена в цепь двигателя.

2. Для ионных выпрямителей с сеточным управлением следует рассматривать две характеристики холостого хода: одну по постоянной составляющей выпрямленного напряжения:

$$U_{gocp} = k_{gocp} U''.$$

а вторую по действующему значению:

$$U_{goef} = k_{goef} U''.$$

Легко доказать, что в нашем случае

$$k_{gocp} = \frac{1}{\pi \sqrt{2}} [2 - \cos \beta_2 - \cos (\beta_1 + \beta_2)],$$

$$k_{goef} = \sqrt{\frac{4\beta_2 + \beta_1}{4\pi} - \frac{3 \sin 2\beta_2 + \sin 2(\beta_1 + \beta_2)}{8\pi}}$$

коэффициент формы выпрямленного напряжения

$$f_{ug} = \frac{k_g \phi}{k_{gocp}},$$

действующая волнистость напряжения

$$w\% = 111 k_{gocp} \sqrt{f_{ug}^2 - 1}.$$

В уравнениях (1) и (2) под U'' понимается действующее значение напряжения вторично обмотки трансформатора на второй, высшей ступени.

На рис. 4 показаны обе характеристики, холостого хода, нагрузочная характеристика, снятая при величине выпрямленного тока $I_{gcp} = 250$ A, а также кривые действующей волнистости и коэффициента формы. Кроме того, там показана кривая w_{sum-1} , иллюстрирующая изменение волнистости выпрямленного напряжения, образованной всеми гармоническими, кроме первой частоты $f = 100$ Hz. Пунктирные кривые построены на основании расчета, а сплошные — по данным эксперимента.

Как видно из приведенного рисунка, характеристика холостого хода для постоянной составляющей U_{gocp} является плавной кривой.

Такой характер этой зависимости обеспечивается соблюдением условий:

$$r = \frac{U'_1}{U'_2} = 0.5; \Theta = 60^\circ,$$

где U'_1 и U'_2 — напряжения вторичной обмотки трансформатора на первой и второй ступени, Θ — так называемый угол перехода, фиксирующий начальный момент принятия нагрузки анодами второй ступени по мере регулирования.

Процесс регулирования напряжения от нуля до максимума протекает следующим образом.

Сначала, в интервале $0 < \beta_1 < 120^\circ$, горят одни лишь аноды низшей ступени при запертых ано-

⁴ Г. И. Бабат, авторск. свид. № 41068. Компания «Электросила», 1932.

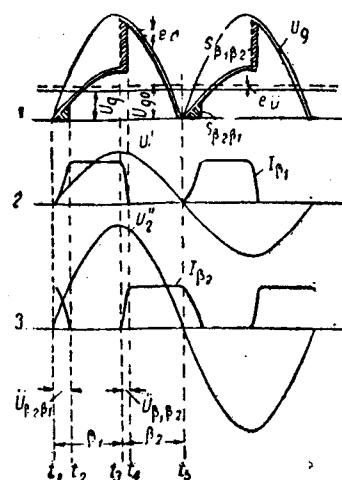


Рис. 5. Перекрытие анодных токов при наличии регулирования (два перекрытия за период). U_{β_1} и U_{β_2} — соответственно углы перекрытия при переходе тока с анода второй ступени на анод первой и, наоборот, анода первой на анод второй ступени; I_{β_1} и I_{β_2} — ток анода первой и второй ступеней

дах высшей (рис. 2). Затем, начиная с $\beta_1 = 120^\circ$, что соответствует значению $\Theta = \alpha = 60^\circ$, аноды высшей ступени также начинают принимать участие в работе (рис. 2, б).

С этого момента при дальнейшем увеличении выпрямленного напряжения угол β_2 возрастает, а угол горения β_1 , сохраняя свою величину, как бы перемещается по синусоиде (рис. 2, б). Начиная же со значения $\alpha = 0$, угол β_2 продолжает возрастать, а β_1 уменьшается (рис. 2). В конце регулирования $\beta_1 = 0$ и $\beta_2 = 180^\circ$.

Горение нулевого анода имеет место лишь в то время, когда $\alpha \neq 0$.

Соответственно такому характеру регулирования может быть введено понятие об условном угле горения β , изменяющемся в интервале от нуля до 300° , как это понятно из рис. 4.

3. Теоретическое рассмотрение явления перекрытия анодных токов, происходящего при двухступенчатой схеме два, а иногда и три раза в течение одной пульсации (рис. 5 и 6), и анализ осцилограмм указывают, что при отсутствии реактивности в цепи нулевого анода кривая выпрямленного напряжения никогда не принимает отрицательных значений⁵. При этом, несмотря на увеличение числа перекрытий, вызываемое ими падение выпрямленного напряжения e_a остается равным на всем диапазоне регулирования, как и в обычных случаях, величине

$$e_a = \frac{I_g X}{\pi} = \text{const}, \quad (8)$$

где X — фазовая реактивность трансформатора,

Это обеспечивает весьма благоприятное изменение коэффициента перекрытия

$$k_a = \frac{U_{g, cp}}{U_{g, cp} - e_a} = \frac{U_{g, cp} - e_a}{U_{g, cp}}. \quad (9)$$

При больших значениях угла регулирования α , когда в работе участвуют одни лишь аноды низшей ступени, а аноды высшей заперты сетками, уменьшается фазовая реактивность X , определяющая значение e_a , и коэффициент k_a возрастает.

На рис. 7 даны кривые k_a для двух значений выпрямленного тока.

⁵ В этом смысле оказались неточными кривые U_g , показанные в цитированной выше работе Schenkel и Issendorff.

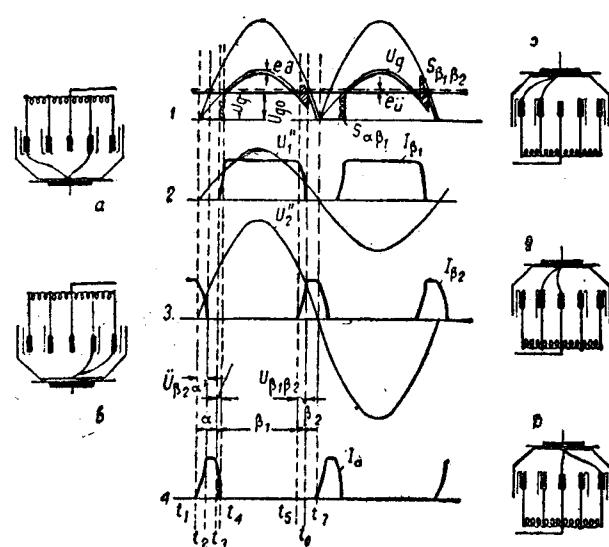


Рис. 6. Перекрытие анодных токов при наличии регулирования (три перекрытия за период). Обозначения — см. рис. 5

На рис. 8 представлены внешние характеристики выпрямительного агрегата

$$U_{g, cp} = f(I_{g, cp}) \text{ при } \beta = \text{const},$$

снятые при четырех разных степенях регулирования. Наклон внешней характеристики определяется падением выпрямленного напряжения вследствие перекрытия e_a и уменьшением амплитуды синусоиды U'' .

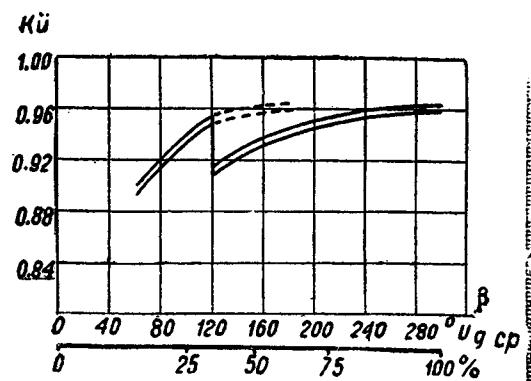


Рис. 7. Зависимость коэффициента перекрытия от регулирования

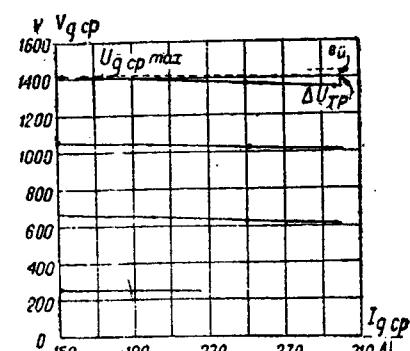


Рис. 8. Внешние характеристики выпрямительного агрегата

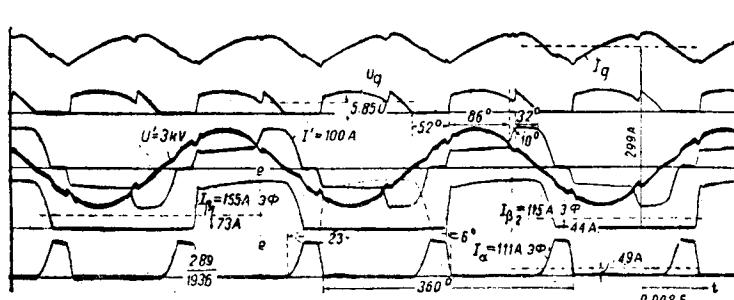


Рис. 9. Осциллограммы токов и напряжений в разных цепях выпрямительного агрегата

Отклонение внешних характеристик от взаимной параллельности объясняется зависимостью величины ΔU от угла горения β , определяющего в свою очередь волнистость тока фазовых анодов при заданной величине.

4. Формы кривых выпрямленного напряжения и тока в разных цепях агрегата видны на осциллограмме (рис. 9), снятой при схеме включения (рис. 3). Шлейф, осциллографировавший анодные токи, был включен у нулевой точки трансформатора (рис. 3, 8), поэтому кривые анодных токов первой и второй ступеней I_{B1} и I_{B2} оказались совмещенными вдоль линии ее. Однако действующие и средние значения этих токов обозначены на осциллограмме порознь.

Суммарная индуктивность на выпрямленной стороне показана на кривой рис. 10.

На рис. 11 даны кривые изменения коэффициентов формы выпрямленного тока f_{Ig} в зависимости от степени регулирования. Как видно, по мере уменьшения за счет регулирования постоянной составляющей выпрямленного напряжения U_{gcp} коэффициент формы приближается к единице.

На рис. 12 показаны кривые, иллюстрирующие зависимость коэффициента мощности от нагрузки при заданных величинах регулирования ($\beta = \text{const}$). Некоторое уменьшение коэффициента мощности по мере увеличения нагрузки объясняется явлением перекрытия.

Как известно, коэффициент мощности ионных выпрямительных агрегатов

$$K = F \cos \varphi,$$

где F — коэффициент искажения формы кривой линейного тока.

На рис. 14 представлено изменение коэффициентов сдвига и искажения. Пунктирные кривые построены для тока строго прямоугольной формы, а сплошные — на основании разложения на гармонические экспериментальных кривых I' , снятых осциллографом.

Сопоставление опытных данных с расчетными, определявшимися для тока прямоугольной формы, показывает, что коэффициент искажения F в действительности несколько ближе к единице, а коэффициент сдвига $\cos \varphi$ несколько меньше ее. Это обстоятельство обусловлено перекрытием волнистостью выпрямленного тока.

5. Исследование одноступенчатой схемы, ха-

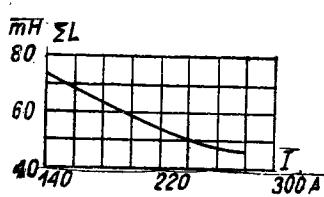


Рис. 10. Индуктивность на выпрямленной стороне

Коэффициент мощности выпрямительного агрегата K' (рис. 12) определяется из следующего уравнения:

$$K' = \frac{k_{gcp} k_u}{\sqrt{2 \left(\frac{k_{\beta_2}}{f_{\beta_2}} \right)^2 + 0,5 \left(\frac{k_{\beta_1}}{f_{\beta_1}} \right)^2}} \quad (10)$$

где f_{β_1} и f_{β_2} — коэффициенты формы анодных токов первой и второй ступеней, а k_{β_1} и k_{β_2} — коэффициенты, учитывающие отклонение среднего значения анодных токов в пределах их углов горения от постоянной составляющей выпрямлен-

6 Величина эта оказалась значительной, так как при экспериментах трансформаторы работали при пониженной индукции.

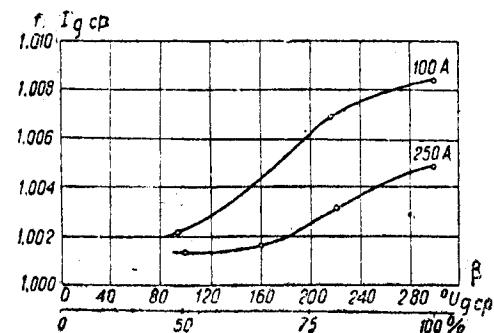


Рис. 11. Зависимость коэффициента формы выпрямленного тока от регулирования

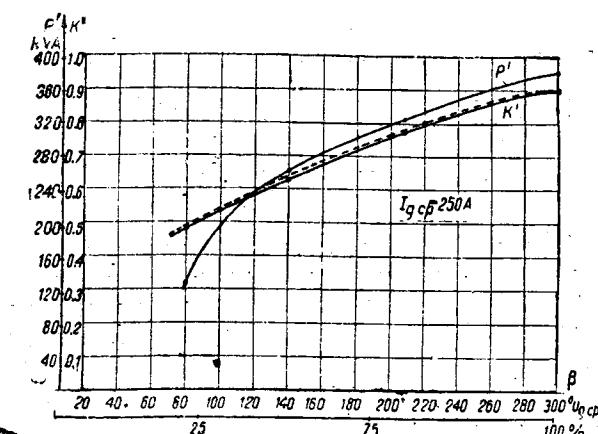


Рис. 12. Зависимость коэффициента мощности от регулирования

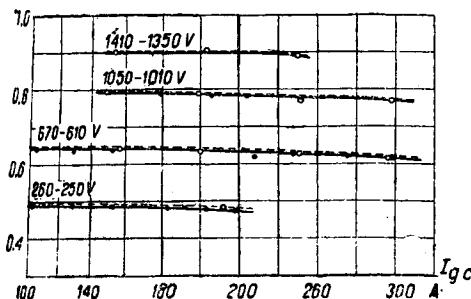


Рис. 13. Зависимость коэффициента мощности от величины выпрямленного тока

рактеризующейся работой одних лишь анодов высшей ступени на всем диапазоне регулирования выпрямленного напряжения — от максимума до нуля, и сравнение полученных результатов с данными исследования двухступенчатой схемы свидетельствуют о значительном превосходстве технических показателей второй схемы.

Это подтверждается кривыми рис. 15.

Кривая 1 этого рисунка иллюстрирует соотношение волнистостей выпрямленного напряжения, 2 — соотношение коэффициентов формы, 3 — коэффициентов мощности. Кривая 4 представляет собой соотношение действующих значений падения выпрямленного напряжения на дросселе, сглаживающем выпрямленный ток (рис. 3, 14).

Каждая из пунктирных расчетных кривых строилась по четырем точкам для значений U_{gc} , равных 25; 50; 75 и 100% U_{gc} максимального (без учета промежуточных колебаний).

6. Типовой двигатель ДПЭ-340 постоянного тока с последовательным возбуждением и дополнительными полюсами, выбранный в качестве объекта исследования, эксплуатируется на магистральных электровозах постоянного тока⁷. Он представляет собой машину с высоким использованием меди и железа. Тип двигателя — закрытый, требующий искусственного воздушного охлаждения (78 $\frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$ воздуха). Номинальная часовая мощность машины — 340 kW. Номинальное напряжение — 1500 V. Число оборотов в минуту при номинальных токе и напряжении — 650. Число главных полюсов — четыре; число дополнительных — также четыре. Обмотка якоря — волновая.

Теоретическое рассмотрение вопроса о возможности питания нормальных двигателей постоянного тока от однофазного выпрямительного агрегата связано с трудностями⁸, так как ряд явлений не поддается точному количественному учету. Решающее значение в подобных случаях приобретает экспериментальное исследование.

Опыты подтвердили необходимость шунтирования обмотки главных полюсов двигателя оми-

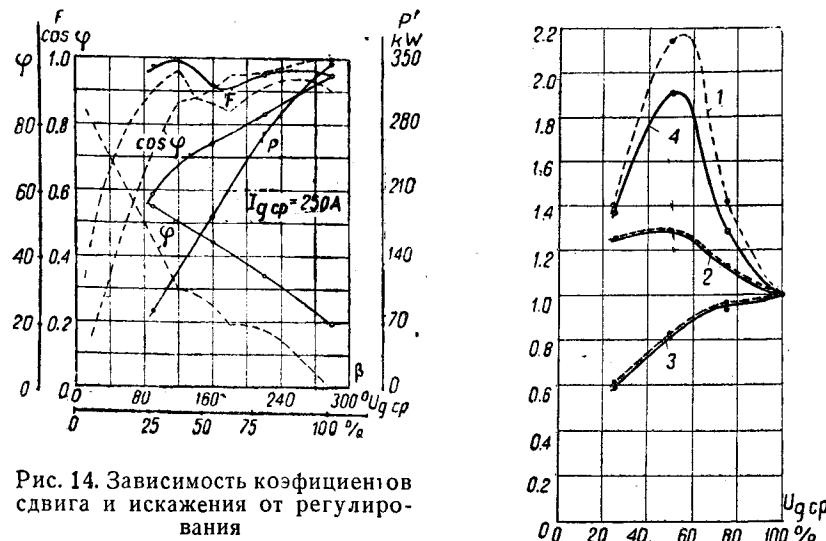


Рис. 14. Зависимость коэффициентов сдвига и искажения от регулирования

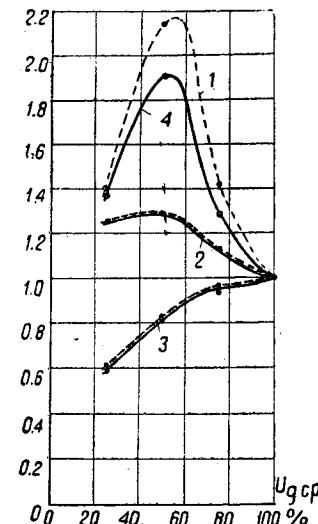


Рис. 15. Соотношение технических показателей одно- и двухступенчатых выпрямительных схем

ческим сопротивлением, величина которого примерно в 10 раз превышает сопротивление самой обмотки.

Наличие этого шунта, практически безиндукционного по сравнению с обмоткой главных полюсов, значительно разгрузило обмотку от высших гармонических, что в свою очередь привело к ослаблению пульсаций магнитного потока в станине машины и к уменьшению потерь на токи Фуко и на гистерезис.

При исследовании тепловых режимов было выяснено⁹, что регулирование выпрямленного напряжения сеточным устройством мало отражается на нагреве машины. Так например, переход при одноступенчатой схеме от угла горения $\beta = 180^\circ$ к углу $\beta = 130^\circ$ при сохранении величины $U_{dc} = 1500$ V привел к увеличению нагрева обмоток двигателя в среднем всего лишь на 4%.

Переход от одноступенчатой схемы к двухступенчатой, обладающей меньшей волнистостью, сопровождается общим уменьшением нагрева обмоток двигателя. Количественно это уменьшение можно оценить примерно в 10%.

Из сопоставления опытных данных с номинальными величинами двигателя ДПЭ-340, относящимися к случаю питания его постоянным током без пульсаций, видно, что снижение тока длительной мощности обмотки главных полюсов получилось порядка 5%. Длительная же мощность остальных обмоток не изменилась. Снижение часовой мощности порядка 3%.

7. На рис. 16 помещены четыре осциллограммы кривых токов и напряжений в обмотках двигателя.

Осциллограммы *a* и *b* сняты при одноступенчатой схеме и защунтированных омическим сопротивлением обмотках главных полюсов; *a* соответствует случаю, когда регулирование отсутствует.

⁷ Выпускается заводом «Динамо» им. С. М. Кирова. Двигатель этот в основном соответствует типу GEC-707, установленному на американских электровозах Сурамского перевала.

⁸ Б. Г. Лившиц, «Электрическая тяга», № 6, 1935.

⁹ Б. М. Шляпошников и Н. Н. Сидоров, Статья в сборнике «К вопросам использования и конструирования локомотивов», вып. 128, 1937, изд. Трансжелдориздат.

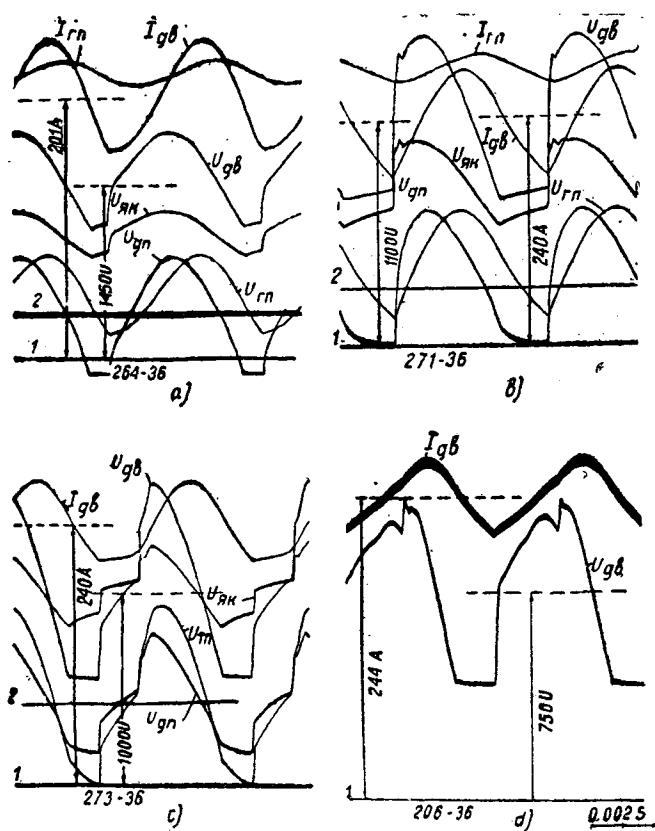


Рис. 16. Осциллограмма токов и напряжений в обмотках двигателя

вует и $U_{\text{дв}}$ имеет наибольшее значение (этот случай может быть отнесен и к двухступенчатой схеме); b — отличается от a напряжением двигателя, которое отрегулировано сеточным управлением до величины, равной приблизительно 75% наибольшего значения $U_{\text{дв}}$.

Осциллограммы c и d сняты при двухступенчатой схеме и незашунтированных обмотках главных полюсов.

Кривая $I_{\text{дв}}$ представляет собой ток обмотки главных полюсов. Шунтирование резко уменьшило значение переменной составляющей; здесь $I_{\text{дв}}$ — полный ток, забираемый двигателем.

8. Рабочие характеристики двигателя показаны на рис. 17. Скоростные характеристики его мало отличаются от характеристик для случая пита-

ния двигателя обычным постоянным током; к. п. д. двигателя оказался ниже на величину порядка 1—2% вследствие увеличения потерь в железе машины из-за пульсаций магнитного потока.

На рисунках кривые к. п. д., относящиеся к случаю питания двигателя от исследованной схемы, показаны сплошными линиями. Пунктиром обозначена типовая кривая к. п. д., характеризующая обычный случай питания.

Коммутация двигателя как при незашунтированной, так и при зашунтированной обмотке главных полюсов может быть признана удовлетворительной. Такой характер коммутации объясняется незначительной величиной пульсационной э. д. с. Так например, при $I_{\text{дв}} = 250$ А и в случае зашунтированной обмотки главных полюсов амплитудное значение пульсационной э. д. с. $e_p = 0,08 \div 0,10$ В. При незашунтированной обмотке для такой же величины тока двигателя $e_p = 0,53 \div 0,64$ В.

Что касается переходных режимов, то протекание их в условиях исследований схемы оказывается более благоприятным, чем в обычных случаях, благодаря наличию добавочной реактивности. Об этом свидетельствует осциллограмма включения и выключения двигателя на ходу под нагрузкой (рис. 18).

9. Как видно из рассмотренного материала, выпрямленное напряжение по мере регулирования не только не ухудшается, но, наоборот, в общем приобретает меньшую волнистость. При этом изменение коэффициента формы характеризуется весьма медленным нарастанием. Благодаря этому кривая выпрямленного тока обладает относительно малыми пульсациями при вполне приемлемых габаритах дросселя.

Коэффициент мощности выпрямительного агрегата принимает в данном случае значения гораздо большие, нежели при других схемах однофазного выпрямления с регулируемым помостью сеточного напряжением.

Нормальный двигатель постоянного тока при питании его от описанной схемы не требует никаких изменений своей обычной типовой конструкции. При увеличении индуктивности дросселя

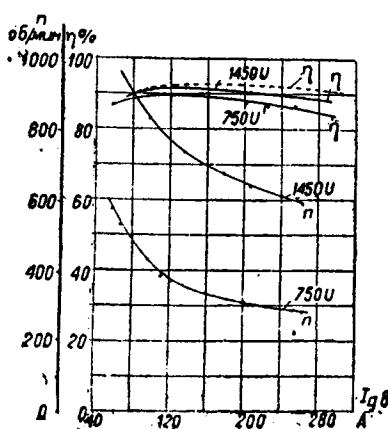


Рис. 17. Рабочие характеристики двигателя

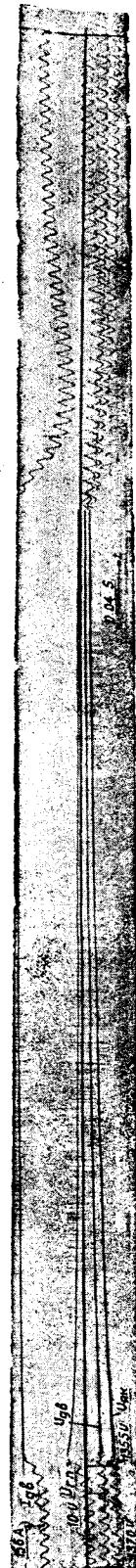


Рис. 18. Осциллограмма включения и выключения двигателя

на 8–10% возможно восстановить полностью номинальную мощность машины и ее к. п. д.

Существенной является возможность пуска двигателей и регулирования их скорости без реостатов за счет применения сеточного управления.

Описанная схема электровоза допускает рекуперативное торможение.

С точки зрения эксплоатации подобного электровоза безусловный интерес приобретает вопрос о возможности построить мощный ртут-

ный выпрямитель в металлическом корпусе без водяного охлаждения и без вакуумных насосов¹⁰.

¹⁰ Настоящая работа возникла и была в основном выполнена в б. Ленинградском электрофизическом институте под общим руководством акад. А. А. Чернышева. Эксперименты были закончены в Ленинградском индустриальном институте, куда переведена руководимая автором лаборатория ртутных преобразователей. Ряд советов по ходу экспериментов был дан инж. В. К. Крапивиным — консультантом лаборатории.

Результаты работы переданы Московскому электровозному заводу „Динамо“ им. С. М. Кирова.

Группа асинхронных двигателей в схеме „электрического вала“

И. М. Садовский
ВЭИ

СХЕМЫ „электрического вала“ применяются для достижения одинаковой скорости вращения двигателей, механически друг с другом не связанных. Они получают все большее распространение, особенно в случае асинхронных двигателей трехфазного тока. Многочисленные работы, посвященные электрическому валу, ограничиваются в основном анализом установки из двух двигателей.

В этой статье исследуется работа такого вала, когда установка состоит из любого числа одинаковых машин n , соединенных по схеме рис. 1 с различной нагрузкой и, соответственно, различными углами сдвига роторов между собой.

Обозначим:

U — напряжение на клеммах статоров асинхронных машин;

I_1 — ток статора i -той машины;

I_2 — ток ротора i -той машины;

$$Z_1 = r_1 + j(x_0 + x_1);$$

$$Z_2 = \frac{r_2}{s} + j(x_0 + x_2);$$

r_1, r_2, x_1, x_2, x_0 — омические и индуктивные сопротивления эквивалентной схемы машины (рис. 2);
 s — скольжение, при котором работает установка.

Уравнение напряжений для цепи статора какой-либо i -той машины имеет вид:

$$U = I_{1i}Z_1 - I_{2i}jx_0. \quad (1)$$

Давая индексу i значения 1, 2, 3, ..., n , получим n уравнений.

Составим теперь уравнения напряжений для цепей роторов: 1) 1-й машины вместе с n -й машиной; 2) 2-й машины вместе с той же n -й машиной и т. д. Так как ротора машин при работе установки сдвинуты между собой на некоторый угол, зависящий от нагрузки, — напряжения на вторичных клеммах можно приравнять друг другу только после умножения их на $e^{j\alpha_i}$ каждое, где α_i — угол сдвига ротора i -той машины относительно некоторой воображаемой оси, вращающейся согласованно с машинами установки. Следовательно,

$$(I_{1i}jx_0 - I_{2i}Z_2) e^{j\alpha_i} = (I_{1n}jx_0 - I_{2n}Z_2) e^{j\alpha_n}. \quad (2)$$

Давая индексу i значения 1, 2, 3, ..., $(n-1)$, получим $(n-1)$ уравнений относительно токов I_{1i} и I_{2i} . Число неизвестных равно $2n$, а число уравнений, получаемых из (1) и (2), — только $2n-1$. Необходимую для определенности еще одну зависимость получаем, применяя первый закон Кирхгофа ко вторичной цепи:

$$\sum_{i=1}^n I_{2i} = 0. \quad (3)$$

Решение системы уравнений (1), (2), (3) дает довольно простые выражения для токов (в процессе решения удобно

ввести вспомогательное неизвестное $\sum_{i=1}^{n-1} I_{2i}$):

$$I_{2i} = \frac{U}{n} \cdot \frac{jx_0 \left[n - \sum_{k=1}^n e^{j(\alpha_k - \alpha_i)} \right]}{Z_1 Z_2 + x_0^2}; \quad (4)$$

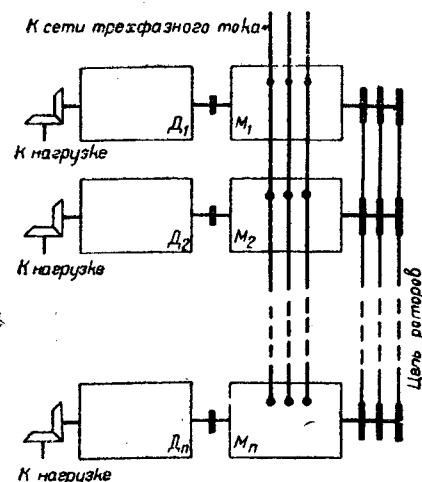


Рис. 1. Схема установки «электрического вала». D_1, D_2, \dots, D_n — приводные двигатели; M_1, M_2, \dots, M_n — асинхронные машины.

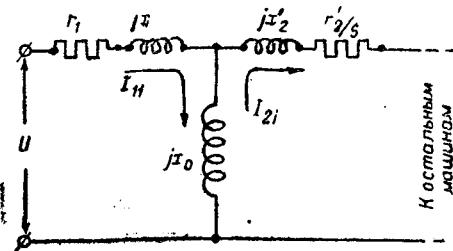


Рис. 2. Эквивалентная схема i -той машины

$$i_{1i} = \frac{\dot{U}}{n} \cdot \frac{nZ_1Z_2 + x_0^2 \sum_{k=1}^n e^{j(\alpha_k - \alpha_i)}}{Z_1(Z_1Z_2 + x_0^2)}. \quad (5)$$

Найдем зависимость моментов машин от скольжения и углов сдвига роторов. Сделав обычное допущение $r_1 = 0$, воспользуемся формулой:

$$M_i = U \frac{i_{1i} + i_{1i}'}{2},$$

где i_{1i}' — сопряженный с i_{1i} комплекс.

Подставляя в эту формулу значения i_{1i} и i_{1i}' и величины Z_1 и Z_2 , после простых преобразований получим:

$$M_i = \frac{U^2}{n\sigma_1} \cdot \frac{\left[n - \sum_{k=1}^n \cos(\alpha_k - \alpha_i) \right] \frac{r_2^2}{s} \sigma_1 + (x_1 + x_2\sigma_1) \sum_{k=1}^n \sin(\alpha_k - \alpha_i)}{[x_1 + x_2\sigma_1]^2 + \left[\frac{r_2}{s} \sigma_1 \right]^2},$$

где $\sigma_1 = \frac{x_0 + x_1}{x_0}$ — коэффициент рассеяния Гопкинсона.

Пользуясь известными из теории асинхронных двигателей выражениями для опрокидывающего момента M_m и соответствующего ему скольжения s_m :

$$M_m = \frac{U^2}{2\sigma_1(x_1 + x_2\sigma_1)}; \quad s_m = \frac{r_2\sigma_1}{x_1 + x_2\sigma_1},$$

получаем окончательно, что момент произвольной машины

$$M_i = \frac{\frac{2}{n} M_m}{\frac{s_m}{s} + \frac{s_m}{s}} \left[n - \sum_{k=1}^n \cos(\alpha_k - \alpha_i) - \frac{s}{s_m} \sum_{k=1}^n \sin(\alpha_k - \alpha_i) \right]. \quad (6)$$

Выражения для вторичных токов и моментов можно еще более упростить, если учесть, что при обычной работе двигателя — вне схемы «электрического вала», при том же скольжении s , при котором работает устройство, ток и момент будут:

$$M = \frac{2M_m}{\frac{s_m}{s} + \frac{s_m}{s}} \quad \text{и} \quad i_2 = \frac{Ujx_0}{Z_1Z_2 + x_0^2}.$$

Подставляя эти значения в равенства (4) и (6), получим:

$$i_{2i} = i_2 \left[1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e^{j(\alpha_k - \alpha_i)} \right],$$

$$M_i = M - \frac{M}{n} \sum_{k=1}^n \left[\cos(\alpha_k - \alpha_i) + \frac{s}{s_m} \sin(\alpha_k - \alpha_i) \right].$$

Рассмотрим применение полученных общих формул в важнейших частных случаях.

1. Установка электрического вала состоит из двух двигателей:

$$n = 2; \quad \alpha_1 = 0 \quad \text{и} \quad \alpha_2 = 0.$$

Один из углов всегда можно считать равным нулю, так как углы отсчитываются от одной и той же оси и в формулы входят только их разности. Когда угол α_a принят равным нулю, остальные углы α_i представляют собою сдвиг ротора i -той машины не по отношению к вращающейся воображаемой оси, а относительно ротора a -той машины.

Подставляя $n = 2$, $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_2 = 0$ в формулы (4), (5) получим:

$$i_{21,22} = \frac{\dot{U}jx_0 (1 - e^{\pm j\alpha})}{2(Z_1Z_2 + x_0^2)};$$

$$i_{11,12} = \frac{2Z_1Z_2 + x_0^2 (1 + e^{\pm j\alpha})}{2Z_1(Z_1Z_2 + x_0^2)}$$

$$M_{1,2} = M_m \frac{\frac{1 - \cos \alpha}{s_m} \sin \alpha}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}},$$

где первому из двух индексов соответствует верхний индекс. Эти формулы полностью характеризуют работу установки. Они, конечно, совпадают с формулами, непосредственно выведенными из рассмотрения работы двух машин по схеме электрического вала ¹.

2. Из общего количества n машин ($n - 1$) нагружены одинаково — $\alpha_n = 0$ и $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_{n-1} = \alpha$.

Тогда общие формулы (4), (5) и (6), дают:

$$i_{2n} = \frac{\dot{U}}{n} (n-1) \frac{jx_0 (1 - e^{j\alpha})}{Z_1Z_2 + x_0^2};$$

$$i_{2i} = \frac{\dot{U}}{n} \cdot \frac{jx_0 (1 - e^{-j\alpha})}{Z_1Z_2 + x_0^2} \quad \text{при } i = 1, 2, 3, \dots, (n-1);$$

$$i_{1n} = \frac{\dot{U}}{n} \cdot \frac{nZ_1Z_2 + x_0^2 [1 + (n-1)e^{j\alpha}]}{Z_1(Z_1Z_2 + x_0^2)};$$

$$i_{1i} = \frac{\dot{U}}{n} \cdot \frac{nZ_1Z_2 + x_0^2 [(n-1) + e^{-j\alpha}]}{Z_1(Z_1Z_2 + x_0^2)} \quad \text{при } i = 1, 2, 3, \dots, (n-1);$$

$$M_n = \frac{\frac{2}{n} M_m}{\frac{s_m}{s} + \frac{s_m}{s}} (n-1) \left[1 - \cos \alpha - \frac{s}{s_m} \sin \alpha \right];$$

$$M_i = \frac{\frac{2}{n} M_m}{\frac{s_m}{s} + \frac{s_m}{s}} \left[1 - \cos \alpha + \frac{s}{s_m} \sin \alpha \right] \quad \text{при } i = 1, 2, 3, \dots, (n-1),$$

Интересно отметить, что для разобранных двух случаев можно построить круговую диаграмму работы устройства.

¹ См., например, статью автора „Согласованное вращение асинхронных двигателей“. „Электричество“ № 22, 1935.

Напряжение и сопротивление дугового промежутка

А. Я. Буйлов
ВЭИ

ПРОБЛЕМА быстрого и надежного отключения поврежденных участков сети является в настоящее время одной из самых актуальных для энергетических систем. В то же время основные теоретические вопросы, связанные с процессом гашения дуги, еще не разрешены и, следовательно, нет основной базы для правильного конструирования дугогасящей части выключателя.

Причины такого положения вещей заключаются прежде всего в сложности явлений, сопровождающих гашение дуги: эти явления в основном сводятся к распаду и воссоединению молекул и атомов газа в быстропеременных электрических полях при высоких температурах и давлениях.

Полное решение этих вопросов требует мощной экспериментальной базы так называемой лаборатории разрывных мощностей, так как при переходе от малых токов к большим параметры, характеризующие процесс гашения дуги, могут претерпевать не только количественные, но и качественные изменения.

Однако исследования в этом направлении с малыми мощностями, несомненно, в значительной степени помогают решению проблемы. Поэтому еще в 1934 г. в ВЭИ были выполнены опыты по изучению условий гашения дуги при токах порядка 100 А и напряжении 6 кВ. Основные результаты опытов опубликованы в литературе [1, 2, 3]. В этой статье автор познакомит читателя с дальнейшим развитием работы.

В 1935 г. нами было установлено [3], что при гашении дуги под маслом после прохождения тока промышленной частоты через нуль следовала серия разрядов емкости на приключенный к дуговому промежутку. Число разрядов достигало 12 ± 15 ; после разрядов дуга потухала мгновенно или же загоралась вновь.

Подобное явление также наблюдал Van Sickle [4] при опытах с большими мощностями. При опытах Van Sickle записывал катодным осциллографом только лишь напряжение, и эти эксперименты 1935 г. сопровождались регистрацией тока или напряжения.

В 1936 г. это явление было более подробно исследовано при одновременной записи тока и напряжения 2-лучевым ионным осциллографом ВЭИ с внешней съемкой. Опыты велись по схеме рис. 1, где O — катодный осциллограф; MO — контур катодного осциллографа; BK — вспомогательный контур; P — разъединитель; G — генератор трехфазного тока 6,6 кВ, 1300 кВт; MB — испытуемый масляный выключатель; C — конденсатор; T — трансформатор.

Опыт производился в следующем порядке: генератор возбуждался до определенного напряжения (обычно 4000 В относительно земли), и разъединитель P включался; испытуемый выключатель одновременно получал импульс на выключение (на рисунке часть схемы, осуществляющая импульс, не показана), и его траверса двигалась вниз; вместе с траверсой перемещался жестко связанный с ней контакт m , соединенный со вторичной обмоткой трансформатора T , первичная обмотка которого питалась главным током опытной цепи. При быстром изменении тока дуги во вторичной обмотке трансформатора T наводилась значительная э. д. с. и при соприкосновении контактов m и n пробивался шаровой промежуток w . Пробой промежутка сопровождался изрядом вспомогательного контура, отчего приходил в действие контур катодного осциллографа.

Контакты m и n замыкались на определенном участке пульта траверсы и тем самым регулировалась длина дуги, при которой производилась регистрация интересующих нас величин. В то же время промежуток w пробивался при заданном напряжении вторичной обмотки T не ниже определенного; это позволило совместить начало записи осциллографом с моментом прохождения тока дуги через нуль, или с близким к нему.

Ток регулировался воздушным реактором L и записывался при помощи бифилярно намотанного сопротивления r порядка 10 Ом; напряжение, как обычно, снималось с емкостного или омического потенциометра.

Для проверки влияния трансформатора T на изменение Δ в дуговом промежутке трансформатор при некоторых шагах включался до реактора L . Такая вариация схемы ни-

какими существенными изменениями в процессе не обнаружилась.

На рис. 2 приведена копия типичной для этих опытов осциллограммы. Чтобы резче выявить характер тока и напряжения на дуге, некоторые из осциллограмм были при помощи эпидиоскопа увеличены в 7—10 раз. Копии их представлены на рис. 3 и 4. На этих же рисунках нанесены кривые изменения сопротивления дугового промежутка

$$r_B = \frac{V}{i}$$

Как видно из рисунков, опыты 1936 г. полностью подтвердили предположения, основанные на работе 1935 г., в масляном выключателе с простым разрывом контактов под маслом после прохождения тока дуги через нуль напряжения на дуге растет до некоторого предела, при котором сопротивление дугового промежутка перестает увеличиваться; дальнейшее повышение напряжения ведет к катастрофическому снижению этого сопротивления (рис. 3 и 4), и в дуге появляется ток. Это не может быть ток генератора, так как скорость изменения его слишком велика, чтобы его мог пропустить реактор L . Действительно, например, для

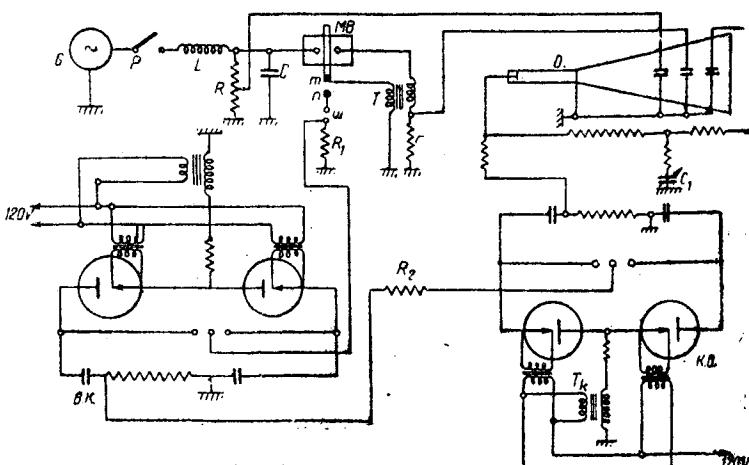
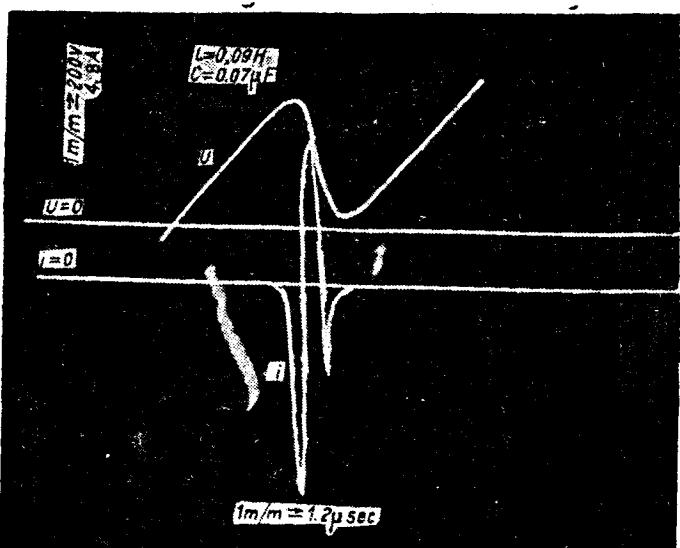


Рис. 1



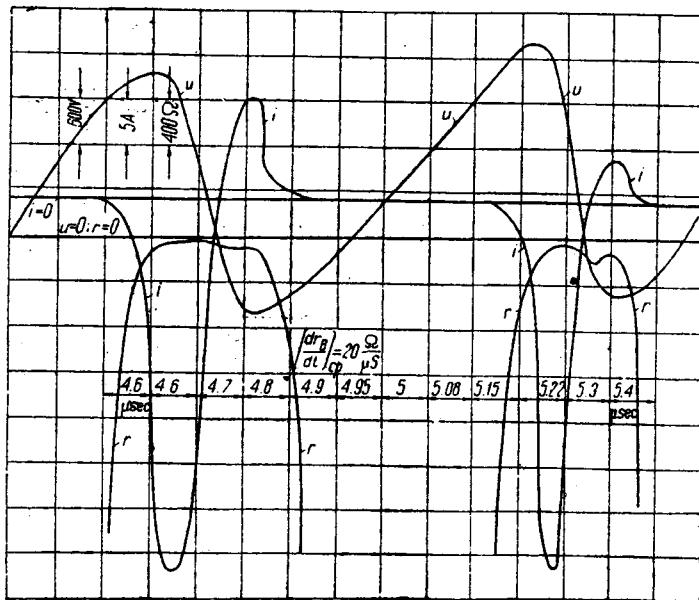


Рис. 3

осциллограммы рис. 3, снятой при средней (для опытов) длине дуги 23 мм,

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{cp} = 10 \frac{A}{\mu sec}.$$

При такой быстроте изменения тока э. д. с. самоиндукции в реакторе должна быть:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -0.09 \cdot 10 \cdot 10^6 = -0.9 \cdot 10^6 V,$$

что, очевидно, не имело места.

В остальных опытах скорость изменения тока была того же порядка. Следовательно, эти всплески тока являются результатом разряда емкости C на дуговом промежутоке. При принятой нами быстроте развертки времени, все всплески тока не могли быть зарегистрированы. В этом отношении исчерпывающий материал дают нам опыты 1935 г., где фиксировалось только изменение напряжения [3].

Из осциллограмм рис. 3 и 4 также видно, что ток в дуге заметно, для наших масштабов, начинает расти еще при подъеме напряжения. Это доказывает, что процессы изменения сопротивления дугового промежутка, напряжения на нем и тока в нем, суть непрерывные функции. Условие гашения дуги переменного тока не может быть отнесено к какому-то одному моменту времени. В формулировке этого условия время должно быть указано, как текущая координата (см. ниже).

На рис. 3 и 4 дана средняя скорость изменения сопротивления, характеризующая рост диэлектрической прочности дугового промежутка. Исключая отдельные значения, полученные для дуги длиной 33 мм (близко к критической), эта величина обычно была порядка нескольких десятков ом в микросекунду. Такое же значение (и даже значительно меньшее) было получено нами при опытах с предохранителями в 1934—1935 гг.

Скорость нарастания сопротивления дугового промежутка при отсутствии влияния восстанавливающегося напряжения и малой длине дуги получилась в 10—20 раз больше. Это показывает, какое колоссальное влияние оказывает восстанавливающееся напряжение на процессы в дуговом промежутке.

При этом пики тока часто получались такого же порядка, что и амплитуда тока промышленной частоты. После каждого всплеска тока дуга «угасала» — ток в ней был очень мал, и после ряда таких всплесков она иногда гасла окончательно. Это доказывает, что при прочих равных условиях легче добиться гашения дуги в начале ее горения. Поэтому дугогасящие устройства, применяемые в выключателях должны действовать, как только дуга возникает, а не после того, как она достигнет определенной длины.

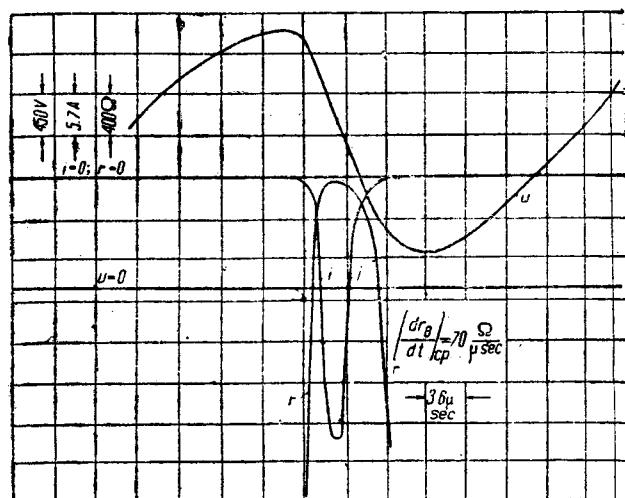


Рис. 4

Напряжение на промежутке не всегда спадает до нуля (рис. 2). Это объясняется тем, что когда напряжение на конденсаторе C , а следовательно, и на дуговом промежутке, новится очень мало, сопротивление промежутка начинает быстро возрастать. Благодаря этому ток генерации может превзойти ток промежутка, и конденсатор начнет разряжаться.

Нередки случаи, когда напряжение на конденсаторе имеет свой знак. Перемене знака сопутствует колебательный процесс в контуре конденсатор — первичная обмотка трансформатора T . В этом случае ток не всегда следует за напряжением (рис. 4), это имеет место лишь при недостаточной скорости изменения сопротивления промежутка.

Общеизвестно, что с точки зрения восстановления напряжения, чем меньше емкость, тем труднее погасить дугу на всплески тока величина емкости оказывает обратный эффект — чем меньше емкость, тем короче всплески и меньше их амплитуда, следовательно, тем легче гасить дугу при емкости в $0,01 \mu F$. Явления всплесков тока наблюдаются сравнительно редко, когда же $C = 0,04$ — $0,125 \mu F$ каждое всплескание дуги выключателя почти неизменно сопровождается разрядами конденсатора на промежуток. Это значит, что для данного дугогасящего устройства (а по всей вероятности, и мощности короткого замыкания) существует какое-то критическое значение емкости. Если учесть еще, что уменьшение емкости нельзя беспредельно увеличивать скорость восстановления напряжения [1, 3], то однозначность влияния емкости на процесс гашения дуги становится весьма сомнительной.

Следует отметить, что для отдельных экспериментов в одинаковых условиях опыта получались значения длины протекания тока в дуговом промежутке во время разрядки конденсатора и его пик, кратные друг другу не сколько раз. Это указывает на одних и тех же параметрах и одной длине дуги нестабильность скорости восстановления в дуговом промежутке.

Подобное же явление, очевидно, имеет место при работе выключателя в сети. Поэтому испытание выключателя нельзя ограничивать одним опытом.

Все изложенное относится к экспериментам с выключателем ВМ-14, с простым однократным разрывом под маслом. Помимо этого, были проделаны опыты при наличии уже выключателя общей камеры масляного дутья, присоединенной к одной из его фаз и выполненной из бакелитовых фанерных досок, т. е. при работе выключателя с двухкратным разрывом на фазу.

При исследовании предохранителей стреляющего всплесков, подобных описанным, как правило, не получали, они были очень редки [3]. Для конструкции выключателя использующей для гашения дуги струю масла, следовало ожидать подобной же картины. Однако, как видно из осциллограммы рис. 5, снятой при длине дуги в области разрыва, равной 10 мм, характер процесса при двухкратном разрыве вполне сходен с таковым для обычного выключателя. Мы объясняем это прежде всего тем, что при токе порядка 100 А энергия дуги была очень мала.

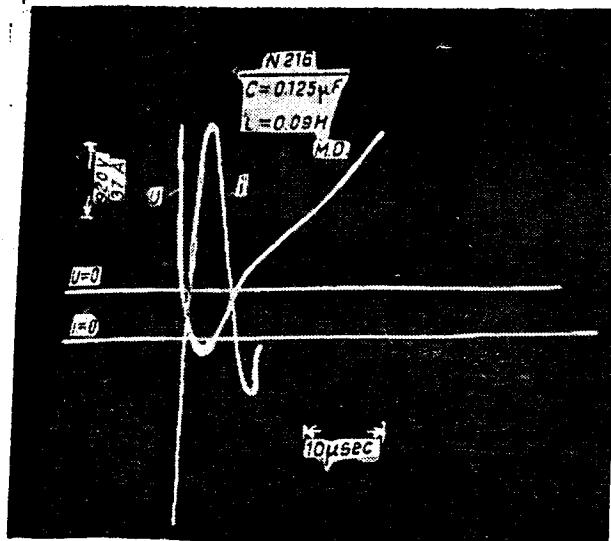


Рис. 5

постоинное движение струи масла очень мало сказывалось на процессе гашения.

Сопротивление дугового промежутка. По вопросу изменения величины диэлектрической прочности дугового промежутка после прохождения тока дуги через нуль в мировой литературе имеется всего 2–3 кривые, полученные Селяном и Брауном [5, 6, 9]. Но они получены без отсечки влияния восстановливающегося напряжения, а отдельные точки кривых соответствуют разным скоростям изменения этого напряжения, поэтому эти кривые нельзя считать полноценными [более подробно об этом см. 1].

Такое положение вещей объясняется, главным образом, сложностью методики эксперимента.

Kesseling [8] рассмотрел теоретически процессы ионизации и деионизации в промежутке дуги переменного тока после прохождения тока через нуль.

При анализе он пренебрег турбулентностью движения газа, влиянием поля на ионизацию и сделал ряд других допущений. В результате он формулу получил для пробивного градиента в функции диаметра дуги, давления в ней и времени. Эта формула дает скорее качественные соотношения, чем количественные. Во всяком случае она не может претендовать даже на приблизительную точность в отражении функциональной зависимости пробивного напряжения от фигурирующих в формуле параметров.

Таким образом вопрос о скорости нарастания и о величине диэлектрической прочности дугового промежутка является открытым во всем объеме.

При постановке описываемой ниже работы, мы задались более скромной задачей, чем измерение диэлектрической прочности дугового промежутка. Мы поставили перед собой якую задачу: после максимально возможного быстрого про-

хождения тока через нуль и начиная с этого момента измерять изменение сопротивления дугового промежутка во времени, не приключая к нему сколько-либо высокого напряжения, влияющего на процесс распада ионизированного столба дуги.

Эта работа была проделана с масляным выключателем BM-5 по схеме рис. 6.

Отделить дуговой промежуток от питающей его сети при помощи какого-либо выключателя невозможно [1].

Эта операция осуществлялась нами закорачиванием промежутка, так что напряжение на нем практически сразу спадало до нуля.

В качестве источника тока мы предпочли генератор постоянного тока G ; при переменном токе трудно синхронизировать моменты времени, в частности „уловить“ момент прохождения тока в дуге через нуль, кроме того, желательно было поставить опыт в более „чистом“ виде: иметь в дуге ток вполне определенной величины и направления.

Одна фаза выключателя была с двукратным разрывом (A и B , рис. 6). Минус генератора заземлялся. Ток регулировался сопротивлением r . Устойчивое горение дуги обеспечивалось индуктивностью L , равной около 0,11 H.

Контакты m_1 и n_1 перемещались вместе с траверсой и при определенной длине дуги давали от вспомогательного контура VK импульс на зажигание контура катодного осциллографа. Другая пара контактов m и n , тоже жестко связанных с траверсой, замыкала выключатель накоротко, и ток шел уже мимо него. Регулируя положение обеих пар контактов, можно было добиться того положения, при котором катодный осциллограф записывал интересующие нас величины. Вывод генератора соединялся через неиндуктивное сопротивление $R \approx 1 M \Omega$ с траверсой выключателя.

Идея метода заключалась в следующем: после закорачивания выключателя напряжение на обоих концах его фазы становилось равным нулю; начиная с этого момента, через сопротивление R на траверсу выключателя подавалось некоторое напряжение, постоянное по своему направлению; разрыв A имел расстояние между контактами на $1-2$ mm больше, чем разрыв B , с тем, чтобы измерения, в основном, производились на промежутке B ; катодный осциллограф записывал напряжение на всем выключателе и на траверсе.

Сближенная пластины осциллографа, уменьшая напряжения на трубке и при помощи других мер удалось получить отклонения зажига на экране, равные около 10 mm на 100 V.

Осциллограммы получались подобные представленной на рис. 7, где U_{AB} и U_B – соответственно, напряжение на всем выключателе и на траверсе.

Имея такую осциллограмму и зная сопротивление R и величину напряжения генератора U_0 , нетрудно подсчитать сопротивление дуги:

$$r_B = \frac{U_B}{U_0 - U_B} R.$$

Подсчитанные по этой формуле сопротивления дугового промежутка нанесены в функции времени на диаграмме рис. 8. Наибольшее напряжение на промежутке – 350 V получались (рис. 8), уже спустя несколько сот микросекунд, когда сопротивление дугового промежутка было уже порядка сотен тысяч ом.

Для первых же 100–200 μ sec напряжение U_B измерялось десятками вольт, и потому мы вправе считать, что оно существенным образом на процессы в промежутке не влияло.

Основные величины, полученные из этих опытов, сведены в таблицу [в таблице $(\frac{dr_B}{dt})_1$ соответствует промежутку

времени 25–50 μ sec, а $(\frac{dU_B}{dt})_2$ в конце зафиксированного процесса].

Кривая $r_B = f(t)$ очень мало отличается от приведенной в

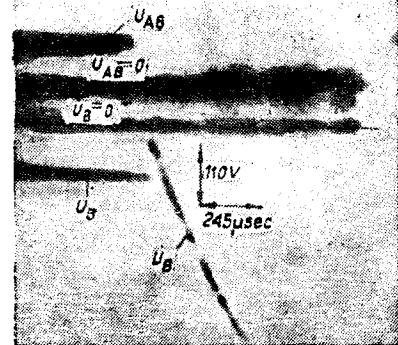


Рис. 7

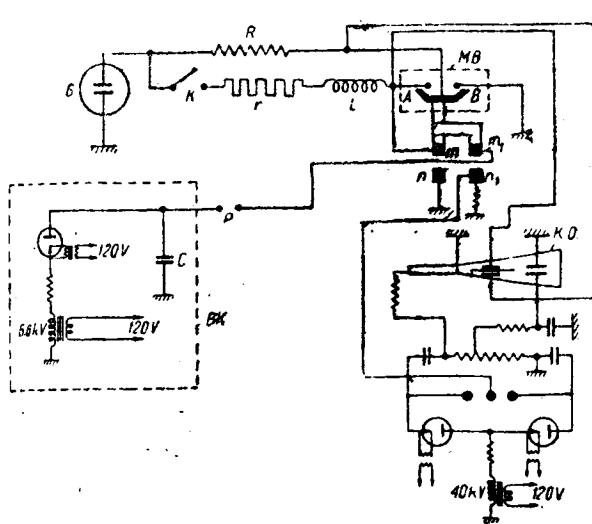


Рис. 6 Вологодская областная универсальная научная библиотека

№ осцилло- грамм	I A	U ₀ V	$\frac{dU_B}{dt}$ V/ μ sec	$(\frac{dr_B}{dt})_1$ Ω/ μ sec	$(\frac{dr_B}{dt})_2$ Ω/ μ sec	Длина дуги мм
420в	45	1000	0,87	916	2900	5
425а	45	1000	0,97	133	1400	10
427а	45	1000	0,57	850	1000	10
428а	45	1000	1,0	1000	1640	10
429а	45	1000	0,76	760	1220	10
439а	33	500	0,27	800	2200	8
439в	33	500	0,37	800	2000	8
439с	33	500	0,21	840	3800	8
440а	33	500	0,34	800	2420	8
441а	15	530	0,38	1000	3400	8
443а	15	530	0,41	1000	2700	8
443в	15	530	0,49	1265	1930	8
443с	15	530	0,45	1260	2300	8
444а	15	530	0,36	1180	1700	8
444в	15	530	0,32	830	1550	8
448а	15	520	0,38	1100	2350	4
448в	15	420	0,34	880	2500	4
451а	33	525	0,27	690	1450	4
451в	33	525	0,32	940	1700	4
452а	33	525	0,4	1300	2250	4
453а	33	525	0,45	1440	2100	8
453в	33	525	0,36	1000	1600	8
453с	33	525	0,4	1100	1900	8
453е	33	525	0,29	1550	3500	8
454а	23	525	0,3	680	2800	8
455а	23	525	0,31	760	2400	8
455в	23	525	0,5	1480	4300	8

Феномени в первые 100–200 μ sec. Поэтому сопротивление дугового промежутка, предоставленного самому себе, можно представить очень простой формулой:

$$r_B = mt,$$

где m — постоянная.

По нашим опытам m , без учета влияния напряжения, для дуги под маслом при длине ее в пределах одного сантиметра

получилось равным $10^9 \div 2 \cdot 10^9 \frac{\Omega}{\text{sec}}$. При скоростях восстановления напряжения в несколько десятков вольт в микросекунду.

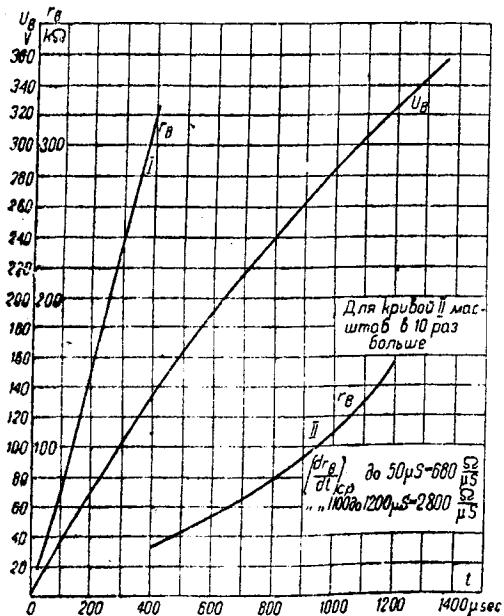


Рис. 8 Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$m = 10^7 \div 10^8 \frac{\Omega}{\text{sec}}.$$

На рис. 9, 10 представлены кривые (жирные линии) их значений величины $\frac{dr_B}{dt}$ и самого сопротивления r_B ,

лученные из осциллограмм, снятых при одном токе и одинаковой длины дуги (так как скорость движения траверсы во всех опытах была одна и та же и при одной длительности гашения дуги). Номер на кривой сопротивления совпадает с номером соответствующей ей осциллограммы 9–10.

Разброс кривых, полученных при разных и тех же условиях опыта, и отклонение их от кривой средних значений еще раз подтверждает выше установленное влияние различных случайных факторов на процесс горения дуги.

Весьма показательно сравнение скоростей нарастания сопротивления при наличии восстанавливавшегося напряжения и без него (вернее, при очень малой скорости восстановления его). Раньше нами было установлено [3], что скорости восстановления напряжения, измеряемой десятками вольт в μ sec, скорость роста сопротивления изменяется десятками ом в микросекунду. То же самое можно видеть на рис. 3, 4 даже при длине дуги в 20–30 мм.

В случае очень малой скорости восстановления (десятки $\frac{V}{\mu sec}$) даже при длине дуги в 4 мм скорость роста

сопротивления измеряется уже $1000 \div 2000 \frac{\Omega}{\mu sec}$ (табл. 1). В этом величину $\frac{dr_B}{dt}$, приведенную в таблице, следует умножить на коэффициент, который колеблется от 1 к 10, так как мы измеряли по сути сопротивление двух параллельных промежутков, включенных параллельно (A и B).

Так как скорость нарастания напряжения на практике часто измеряется тысячами вольт в микросекунду, следовательно, что оно имеет громадное влияние на процесс в промежутке.

Hameister [11] собрал опытные данные о влиянии скорости восстановления напряжения на гашение дуги из различных литературных источников и представил их в виде кривых рис. 11. Эти данные не в коем случае не могут рассматриваться как исчерпывающие; количество опытов в пазон мощностей и токов, при которых они производились, слишком мало, чтобы дать более или менее полный ответ на вопрос. Однако из этих данных можно было бы сделать два вывода:

1) Степень влияния скорости восстановления напряжения на процесс гашения дуги зависит от конструкции выключателя.

К такому же выводу пришли на основании наших опытов с малыми мощностями [3].

2) После некоторого зажигания этой скорости дальнейшее увеличение мало сказывается на процессе гашения дуги.

Последний вывод является сомнительным по своей пропорциональности.

В большинстве этих опытов скорость восстановления напряжения подсчитывалась теоретическим формулам, учитывающим влияние сопротивления дугового промежутка.

Нами было показано [3], что для каждой конструкции выключателя есть какое-то значение емкости системы, при дальнейшем уменьшении которой скорость восстановления напряжения практически не увеличивается.

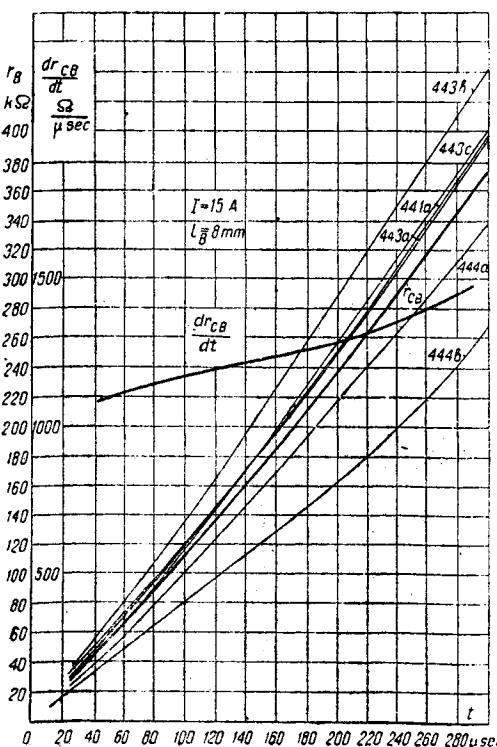


Рис. 9

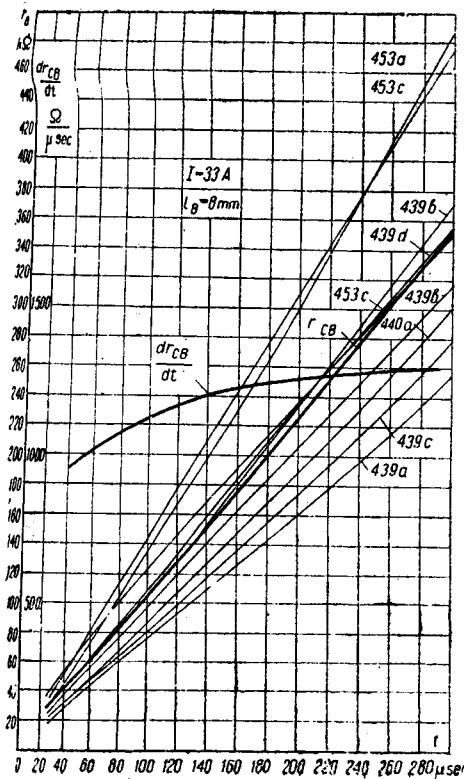


Рис. 10

потому что сопротивление дугового промежутка сказывается на этой скорости тем сильнее, чем меньше емкость сети, т. е. чем больше теоретическая величина собственной частоты колебаний системы.

Некоторые исследователи [12] рекомендуют при испытании выключателей нормировать теоретическую скорость восстановления напряжения.

Мы считаем это предложение неправильным, так как на эту скорость влияет не только сопротивление дугового промежутка, но и емкость системы, и при одной и той же частоте собственных колебаний системы фактическая скорость восстановления напряжения различна даже при одном и том же типе выключателя. Ориентироваться в этом случае на максимум этой величины нельзя, так как его будет трудно осуществить при опытах, а ориентироваться на низкие значения рискованно. Теоретически же подсчитать эту величину для большинства промышленных сетей очень трудно; ошибки в этом случае могут достигать десятков процентов. Даже о какой-то средней величине этой скорости тоже говорить рано.

Некоторые авторы (преимущественно американские) указывают, что с увеличением напряжения сети растет и скорость восстановления напряжения (от 2000 до 10 000 $\frac{V}{\mu\text{sec}}$).

Наоборот, из кривой (рис. 11) собственных колебаний сети в зависимости от напряжения (Hameister [11]) следует, что скорость нарастания напряжения одинакова; в среднем для сетей всех напряжений эта величина оценивается им в $4000 \frac{V}{\mu\text{sec}}$.

Таким образом для нормирования выключателей на скорость восстановления напряжения еще мало данных.

Располагая данными о сопротивлении дугового промежутка за время нестационарного процесса, когда решается вопрос быть или не быть новому зажиганию дуги, более правильно условие гашения дуги характеризовать следующим образом:

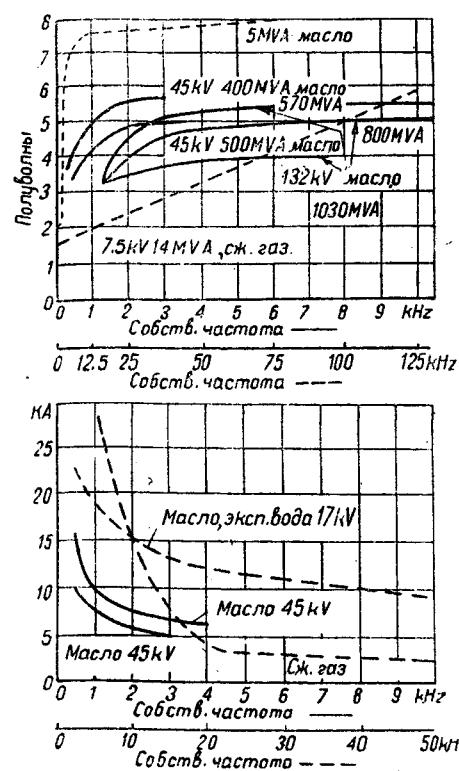


Рис. 11

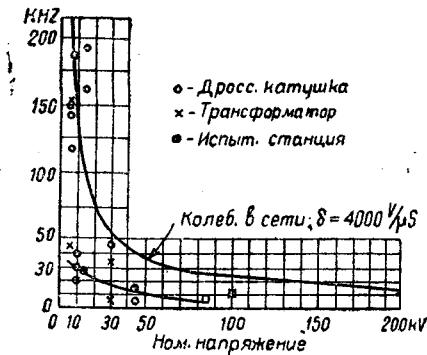


Рис. 12

Дуга тухнет тогда, когда, начиная с некоторого момента времени, скорость нарастания сопротивления дугового промежутка остается все время выше скорости роста напряжения на нем:

$$\frac{dU}{dt} < k \frac{dr_B}{dt}$$

где k — некоторая постоянная, зависящая от конструкции выключателя и, что очень возможно, — от постоянных сетей.

По нашим опытам, описанным выше, даже при небольших скоростях восстановления, напряжение на промежутке может в десятки раз уменьшать скорость роста сопротивления дугового промежутка. В свою очередь и сопротивление дугового промежутка в сильной степени снижает скорость нарастания напряжения на нем.

Поэтому вполне возможно, что при подробном всестороннем изучении этого вопроса окажется, что испытания выключателей следует производить при постоянных цепях, определяемых испытуемой конструкцией выключателя. Такое соображение кажется особенно верным для выключателей (и мощностей, возможно), у которых после прохождения тока через нуль наблюдаются последовательные разряды емкости на дуговой промежуток, так как величина емкости характеризует величину разрядного тока. Притом увеличение емкости, приключенной параллельно дуговому промежутку, не всегда должно повести к улучшению процесса выключения.

Литература

1. Буйлов, Бюллетень ВЭИ № 1, 1935.
2. Буткевич, там же.
3. Буйлов, «Электричество», № 1, 1936.
4. Van Sickle, El. Engng. № 2, 1935.
5. Browne, Transaction AIEE, march 1932.
6. Slepian, Transaction AIEE № 2, 1929 и № 2, 1930; Е и М, Н. 14—15, 1933.
7. Dow Attwood, Timoshenko. Transaction AIEE, V. 52, 1933, p. 926.
8. Kesselring, Archiv für Elec., H. 1, 1935.
9. Flursheim, Journal of IEE № 459, 1935.
10. Hameister, VDE Fachberichte, 1935.
11. Hameister, ETZ, H. 36 и 37, 1936.
12. Skeats, Transaction AIEE, 1933 September. (Дискуссия к статье Van Sickle.)

Влияние предварительной ионизации на вольтвременные характеристики

Л. И. Паш
Ленинград

ВСЕ современные теории искрового разряда придают исключительное значение начальному действию электрона и объемным зарядам в разрядном промежутке.

В экспериментальной практике [1], освобождая разрядный промежуток от пыли и влаги — агентов предварительной ионизации, были достигнуты градиенты электрического поля до $5 \cdot 10^8$ В/см, что приблизительно в 16 раз превосходит нормальные значения пробоя. В этих случаях освещение промежутка ультрафиолетовым светом влекло за собой интенсивное развитие разряда, что, очевидно, было обусловлено начальным действием электронов.

Предразрядное время — время от момента приложения напряжения к искровому промежутку до момента развития разряда, характеризует собой полное время, в течение которого подготавливается и развивается разряд.

Это время t , как известно, является функцией напряжения E и подчиняется закону вероятности [1]. В частности, оно согласуется с эмпирической формулой, предложенной Л. Е. Машкиллейсоном [2],

$$E = E_0 \sqrt{1 + \frac{T}{t}},$$

где E_0 и T — коэффициенты.

Но это время зависит также от предварительной ионизации искрового промежутка [3].

В 1887 г. Hertz первый открыл, что разряд на промежутке происходит при меньших напряжениях, когда он облучается ультрафиолетовым светом.

Позднее, в результате ряда исследований влияния предварительной ионизации радием, ультрафиолетовыми лучами, токами высокой частоты и т. п. [4] были установлены следующие положения:

1) предварительная ионизация уменьшает разрядное напряжение и

2) предразрядное время;

3) предразрядное время является функцией интенсивности освещенности ультрафиолетовым светом, и, следовательно, начальное действие числа первичных агентов ионизации играет значительную роль в развитии разряда;

4) предразрядное время не зависит от материала разрядных поверхностей.

Публикуемая работа, проведенная в высоковольтной лаборатории Ленинградского электротехнического института,

имела своей целью экспериментальное определение влияния предварительной ионизации ультрафиолетовым светом при высоких напряжениях с учетом влияния их поляризации.

Методика. В качестве источника ультрафиолетовых лучей были использованы две кварцево-рутных лампы. Накалы ламп производили постоянным током при напряжении 500 в и токе 3—3,5 А. Этот режим был сохранен во время всех экспериментов.

Исследовались искровые промежутки между шарами диаметром 12,5 см при

$$S = 40 \text{ и } 240 \text{ мм}$$

и между шариком и плоскостью (шарик бронзовый диаметром 20 мм) для

$$S = 82 \text{ и } 137 \text{ мм.}$$

Материал разрядных поверхностей — чистая или никелированная бронза.

Самостоятельной темой являлось изучение влияния освещенности разрядных поверхностей изоляторов на их вольтвременные характеристики, для чего был исследован оптический изолятор на номинальное напряжение 6 кВ типа ОИ.

Освещался только изолированный электрод искрового промежутка, т. е. обе лампы находились у заземленного электрода.

Известно из общих курсов физики [5], что ультрафиолетовые лучи представляют поток фотонов с некоторым запасом энергии $h\nu$, где h — постоянная Планка и ν — частота. Этот поток способен произвести объемную ионизацию и также вызвать поверхностную ионизацию — выделение электронов с поверхности металла при падении потока фотонов на эту поверхность.

Необходимым условием при этом является наличие избытка энергии фотона над работой ионизации или работой выхода электрона соответственно.

Ионизация ультрафиолетовым светом в искровом промежутке, помещенном в воздухе при нормальном давлении 750 мтт Hg и средней температуре 25°, может произойти только за счет фотоэлектрического эффекта, так как энергия потока фотонов недостаточна для ионизации молекул воздуха.

Поверхностная же ионизация возможна в этом случае, так как нижний предел излучения кварцево-рутной лампы со

ответствует 2250 Å, а „длинноволновая граница”, т. е. та наибольшая длина волны излучения, при которой еще происходит фотоэлектрический эффект для бронзы и никеля, соответствует 2560—3350 Å.

Степень ионизации в разрядном промежутке оценивалась помощью электроскопа с микроскопом.

Влияние паразитных электрических полей исключалось тщательным экранированием всего прибора. На рис. 1 приведена фотография общего вида прибора с экраном и кварцево-рутной лампой.

Оценка степени ионизации осуществлялась следующим образом: листок электроскопа заряжали до определенного потенциала, вносили зонд прибора в искровой промежуток и при различных расстояниях зонда от освещенной поверхности по времени спадания листка электроскопа судили о степени ионизации.

Предварительными экспериментами было выяснено, что 1) без облучения время спадания листка электроскопа на одно деление

шкалы очень велико ($a = \frac{t}{n} = 24 - 30$ мсек/дел), 2) при спадании листка электроскопа на одно деление

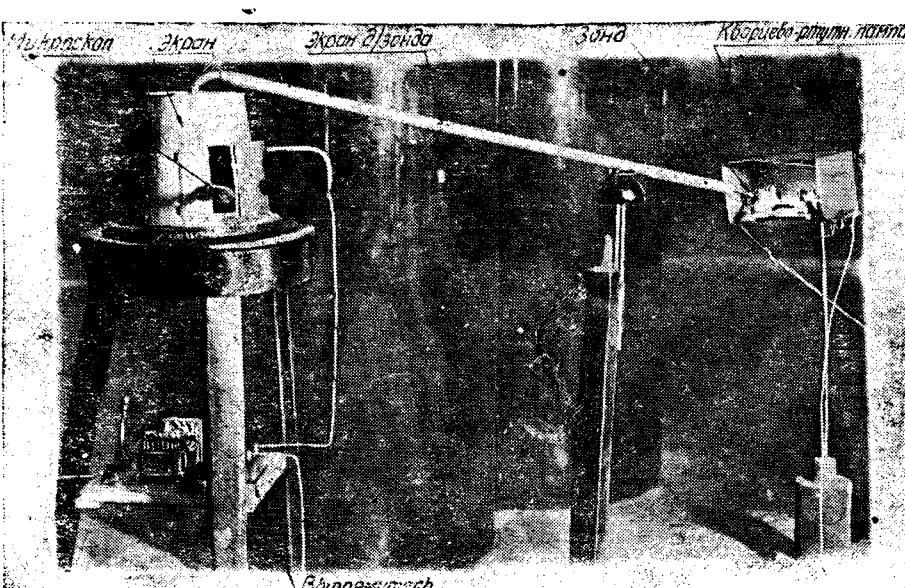


Рис. 1. Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

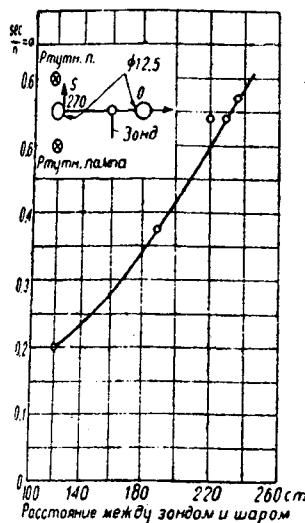


Рис. 2. Вольтвременная характеристика

сторону, обеспечить максимальную освещенность, а с другой — исключить разряды с электрода на арматуру ламп. При этом расположении определяли характеристику ионизации. Переходя к другому, меньшему расстоянию между электродами, характеристику ионизации сохраняли, для чего изменяли соответственно расположение объектов.

На рис. 2 приведена одна из полученных характеристик. По оси ординат отложено время спадания листка электротензона на одно деление шкалы, а по оси абсцисс — расстояние зонда прибора от освещенной поверхности электрода (тут совпадает с поверхностью освещенного шара). Характеристика показывает присутствие фотоэлектронов во всем объеме искрового промежутка вплоть до границы заземленного электрода.

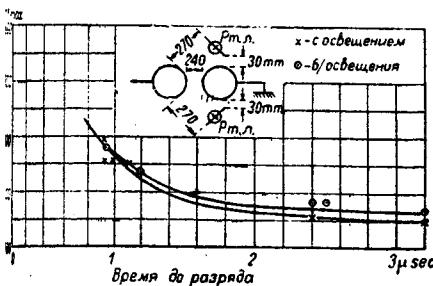
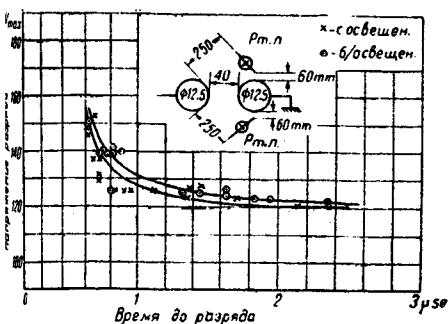
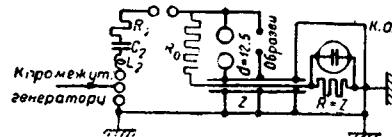
Рис. 4. Вольтвременная характеристика шаров $\varnothing 12,5$ см. $S = 240$ мм (волна $1,5/40$ мкес; полярность $[+]$; $b = 760$ мм Hg; $t = 25^\circ$; влажность $4,5 \text{ gr/m}^3$)Рис. 5. Вольтвременная характеристика шаров $\varnothing 12,5$ см. $S = 40$ мм (волна $1,5/40$ мкес; полярность $[+]$; $b = 760$ мм Hg; $t = 25^\circ$; влажность $4,51 \div 5,18 \text{ gr/m}^3$)

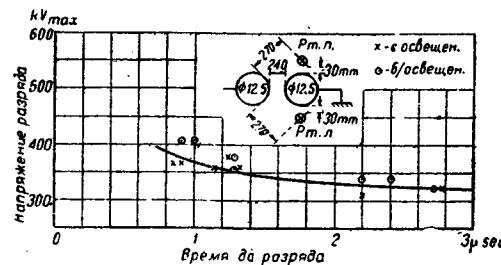
Рис. 3. Общая схема катодного осциллографирования

ний шкалы) и 2) что при положительном потенциале листка спадание его происходит более интенсивно, очевидно благодаря избытку электронов в этом случае в объеме искрового промежутка. По этому при всех последующих опытах листок заряжался положительно.

При наибольшем для данной конфигурации искрового промежутка расстояния подбирали такое положение ламп, чтобы, с одной

стороны, обеспечить максимальную освещенность, а с другой — исключить разряды с электрода на арматуру ламп. При этом расположении определяли характеристику ионизации. Переходя к другому, меньшему расстоянию между электродами, характеристику ионизации сохраняли, для чего изменяли соответственно расположение объектов.

На рис. 2 приведена одна из полученных характеристик. По оси ординат отложено время спадания листка электротензона на одно деление шкалы, а по оси абсцисс — расстояние зонда прибора от освещенной поверхности электрода (тут совпадает с поверхностью освещенного шара). Характеристика показывает присутствие фотоэлектронов во всем объеме искрового промежутка вплоть до границы заземленного электрода.

Рис. 6. Вольтвременная характеристика шаров $\varnothing 12,5$ см. $S = 240$ мм (волна $1,5/40$ мкес; полярность $[+]$; $b = 760$ мм Hg; $t = 16,8^\circ$ C; влажность $4,5 \text{ gr/m}^3$)

В случае шарик — плоскость характеристика ионизации расположена значительно выше, что соответствует малой плотности фотоэлектронов в разрядном промежутке.

Предразрядное время как функция напряжения и предварительной ионизации ультрафиолетовым светом устанавливалось помошью катодного осциллографа с внутривакуумной съемкой. Отсчет времени производили по осциллограммам от момента приложения напряжения к искровому промежутку до момента полного разряда, т. е. до момента кругового спада волны напряжения.

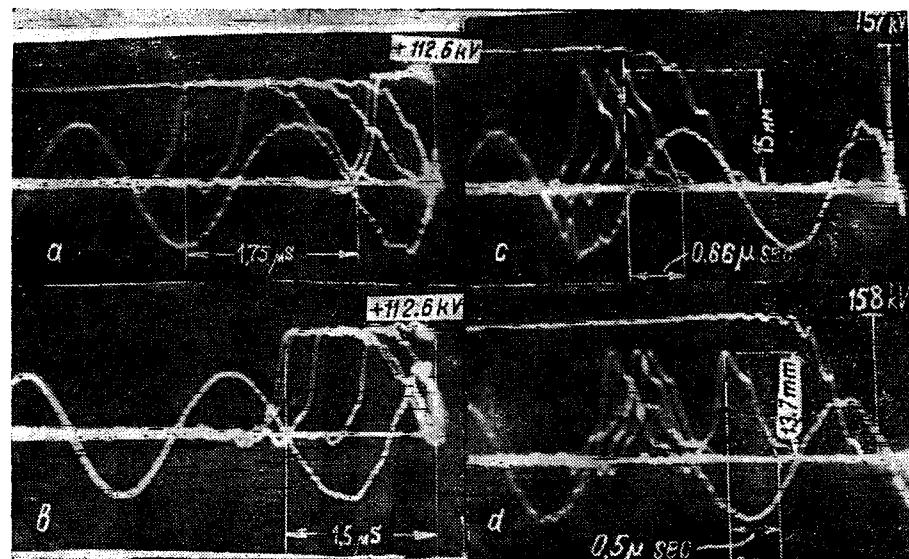
Минимальное разрядное напряжение на искровом промежутке определяли шарами диаметром 12,5 см без облучения по данным Bellaschi [9] методом 50%. Напряжение разряда, когда явление протекало на фронте волны, вычислялось из осциллограмм, зная полное приложенное напряжение, которое также измеряли шарами диаметром 12,5 см.

Общая схема катодного осциллографирования не отличалась от обычной и приведена на рис. 3.

Экспериментальные данные. На рис. 4, 5 и 6 приведены вольтвременные характеристики искрового промежутка шаров диаметром 12,5 см для $S = 40$ и 240 мм при и без облучения.

Из характеристик видно, что эффект снижения напряжения и изменения предразрядного времени вследствие ионизации имел место в том случае, когда к освещенной сфере прикладывали положительный импульс.

На рис. 7, a и b — осциллограммы разряда на искровом промежутке при $S = 40$ мм, снятые при облучении и без него при напряжении, соответствующем минимальному разрядному с подсвечиванием. Осциллограммы показывают, что предразрядное время значительно меньше при облуче-

Рис. 7. Осциллограммы разряда при минимальном разрядном напряжении для шаров $\varnothing 12,5$ см при $S = 40$ мм: a — без ионизации; b и d — при дополнительной ионизации

ни. Величина его в случае облучения одинакова для всех разрядов, доходящих до семи, следующих друг за другом. При отсутствии дополнительной ионизации предразрядное время не стабильно и колеблется в пределах от максимального значения, близкого, но не равного таковому при освещении.

При разряде на фронте (рис. 7, с и д) влияние предварительной ионизации сохраняется.

Tiedeman [3] один из первых изучил вопрос уменьшения предразрядного времени или части его — времени запаздывания вследствие предварительной ионизации — и показал уменьшение предразрядного времени при возрастающей интенсивности облучения.

Он же и другие авторы [1, 4, 5] отмечали, что главный эффект ультрафиолетового света заключается в снижении предразрядного времени, в меньшей степени он оказывается на уменьшение разрядного напряжения. В наших экспериментах это явление находит свое подтверждение.

Указанные авторы в своих работах отмечали, что при облучении измерительного искрового промежутка разряд становится более стабильным, отсутствует разброс точек измерения, обеспечивается большая точность отсчета предразрядного времени.

Эффект облучения в большей степени оказывается при измерении напряжений малой амплитуды (до 25—40 кВ) малыми сферическими искровыми промежутками. Ионизация резко влияет при крутых фронтах (0,5 μ sec), чем при пологих (1,5 μ sec и больше), и меньше всего при напряжениях 50 Hz [7].

Исходя из этого, следует рекомендовать пользоваться предварительной ионизацией (ради, ультрафиолетовый свет и др.) искрового промежутка при измерении стандартных форм импульсных напряжений малой амплитуды, когда измерение производится малым искровым промежутком со сферическими поверхностями. Предварительную ионизацию особенно следует рекомендовать при измерении напряжения с крутым фронтом (0,5 μ sec), когда эффект ионизации наибольший.

Естественно, что при измерениях с дополнительной ионизацией необходимо произвести градуировку промежутка, сохранив интенсивность ионизации. Градуировку можно произвести по методу, изложенному в работе Bellaschi, помощью катодного осциллографа [9].

Уменьшения разрядного напряжения или сокращения пред-

разрядного времени при отрицательных импульсах на южной сфере в наших экспериментах не обнаружилось, этому вопросу в литературе почти нет экспериментальных данных. Другие авторы облучали одновременно обе полушария и располагали источник ионизации метрично.

Исключение составляет работа Swyngedaaw [8], который косвенно обнаружил весьма слабый эффект по ионизации.

При наших опытах влияния ионизации для искрового междугородия шарик—плоскость мы не наблюдали. Никакого эффекта облучения не было обнаружено в этом случае и минимальных разрядных напряжениях.

Весьма интересно было выяснить влияние ионизации разряда по изоляторам. Как обнаружено нами, и в этом случае — при освещении поверхности изолятора ОБ-6 ультрафиолетовым светом, эффекта ионизации не наблюдается.

Литература

1. J. J. Thomson, Conduction of Electricity through gases, V. II, 1933, p. 470.
2. Л. К. Машкиллесон, Эмпирическое уравнение для расчета импульсных характеристик изоляторов искровых промежутков. (Доклад на международной конференции по большим электросетям высокого напряжения.)
3. I. A. Tiedeman, The time lag of the electric spark, Physics, V. 1, December 1931, p. 354.
4. W. E. Bergkeu, Radium improves operation of the spark gaps, El. I. March 1934, p. 101.
5. G. L. Nord, Effect of ultraviolet light on breakdown voltage, E. E. September 1935, p. 955.
6. А. Энгель и Н. Штенбек, Физика и техника электрического разряда в газах. Т. I, 1935.
7. K. Masch, Durchschlagsspannung und Bestrahlung, Acta Electr., 1930, S. 561.
8. Swyngedaaw, Rapports présentés au congrès International de Physique, Paris, III, p. 164, а также в [1], p. 472.
9. P. L. Bellaschi, Impulse calibration of sphere gaps, El. June 1934, p. 232.

¹ Работа была автором проведена под руководством техн. наук А. А. Горева.

Схемы счетчиков активной и реактивной энергии для 3 и 4-проводной сетей трехфазного тока

А. А. Кеф
Ленинград

Известно, что для учета активной и реактивной энергии в n -проводной сети необходим счетчик соответствующим n углам сдвига фаз между рабочими магнитными потоками, имеющий не менее $n-1$ движущийся элемент. Применение счетчиков с меньшим числом элементов или с иными углами сдвига фаз между рабочими потоками возможно только при наличии определенных соотношений между напряжениями или токами. Мы ограничимся разысканием схем счетчиков для непосредственного включения в сеть пригодных при симметрии напряжений или напряжений и токов.

Введем следующие обозначения:

U_1, U_2 и U_3 — фазные напряжения;

U_{11}, U_{12}, U_{13} — фазные напряжения прямой последовательности фаз;

U_{21}, U_{22}, U_{23} — фазные напряжения обратной последовательности фаз;

U_0 — фазные напряжения нулевой последовательности фаз;

I_1, I_2, I_3, I_0 — линейные и нулевой токи;

$I_{11}, I_{12}, I_{13}, I_{21}, I_{22}, I_{23}$ —

www.booksite.ru

I_0 — соответственно токи прямой, обратной и нулевой последовательностей фаз; $\varphi_{12}, \varphi_{10}$ — углы между векторами фазного напряжения первой фазы прямой последовательности фаз с векторами тока прямой, обратной и нулевой последовательностей; $\varphi_{21}, \varphi_{22}, \varphi_{20}$ — то же, но для векторов фазного напряжения обратной последовательности; $\varphi_{01}, \varphi_{00}$ — то же, но для вектора фазного напряжения нулевой последовательности.

Счетчики активной энергии. Схемы для трехпроводной сети (один движущий элемент). В зависимости от используемого напряжения все схемы для трехпроводной сети можно разбить на две группы: схемы с линейным и схемы с фазным (с искусственной нулевой точкой) напряжением.

Группа 1. Представим себе движущий элемент счетчика состоящим из двух магнитопроводов, на которые наложена параллельная обмотка, питаемая напряжением U_1-U_2 ; три последовательные обмотки, имеющие n_1, n_2 и n_3 витков, питаемые соответственно токами I_1, I_2 и I_3 . Предполагаем для простоты вычислений, что рабочие потоки, создаваемые этими токами, находятся в фазе с ними, найдем, что пропорциональность врачающего момента счетчика мо-

ности, потребляемой сетью, необходимо удовлетворить следующему уравнению:

$$m_1 I_1 \sin(-\phi + \varphi_1) + m_2 I_2 \sin(\phi + 120^\circ + \varphi_2) = k [I_1 \cos(\varphi_1 - 60^\circ) + I_2 \cos \varphi_2], \quad (1)$$

где $m_1 = n_1 - n_3$, $m_2 = n_2 - n_3$ и ϕ — угол сдвига фаз между рабочими потоками.

Введя дополнительное условие симметрии токов, из уравнения (1), получим:

$$m_1 = 2k \cos(\phi + 30^\circ); \quad (2)$$

$$m_2 = 2k \cos(\phi - 30^\circ). \quad (3)$$

Теоретически выбор ϕ ничем не ограничен, поэтому существует бесконечно много схем одноэлементного счетчика для учета энергии в трехпроводной сети при равномерной нагрузке фаз.

Группа 2. Принимая, что в схеме использовано напряжение U_1 , значения m_1 и m_2 получим из уравнений (2) и (3), заменив в них ϕ на $\phi + 30^\circ$ и k на $k \sqrt{3}$:

$$m_1 = 2\sqrt{3} k \sin(30^\circ - \phi); \quad (4)$$

$$m_2 = 2\sqrt{3} k \cos \phi. \quad (5)$$

Схема для четырехпроводной сети. Из предыдущего следует, что одноэлементные счетчики пригодны только при равномерной нагрузке фаз. Схемы их те же, что и для трехпроводной сети.

В зависимости от использованных напряжений все схемы счетчиков с двумя движущими элементами могут быть разбиты на следующие 5 групп: схемы с двумя фазными напряжениями, с фазным напряжением и смещенным относительно него на 90° линейным напряжением, с фазным напряжением и опережающим его (одна группа) или отстающим от него (другая группа) на 30° линейным и схемы с двумя линейными напряжениями.

При разыскании схем двухэлементных счетчиков мы ограничим себя условием соответственного равенства между собою в обоих элементах следующих величин: 1) коэффициентов пропорциональности между рабочими потоками параллельных цепей и приближенными к ним напряжениями; 2) углов сдвига фаз между рабочими потоками и 3) коэффициентов пропорциональности между рабочими потоками последовательных цепей и создающими их ампервитками.

Группа 1. Налагая на магнитопроводы последовательных цепей элементов по 4 обмотки с числом витков n_1 , n_2 , n_3 и n_0 и n'_1 , n'_2 , n'_3 и n'_0 , питаемые токами I_1 , I_2 , I_3 и I_0 , считая, что к параллельным цепям элементов приложены соответственно напряжения U_1 и U_2 , и решая уравнения — условия пропорциональности врачающего момента счетчика мощности, потребляемой сетью при неравномерной нагрузке фаз, необходимо и достаточно удовлетворить следующим уравнениям:

$$m_1 \cos \phi - m'_1 \sin(\phi + 30^\circ) = 0; \quad (6)$$

$$-m_1 \sin \phi - m'_1 \cos(\phi + 30^\circ) = k; \quad (7)$$

$$-m_2 \sin(30^\circ - \phi) + m'_2 \cos \phi = 0; \quad (8)$$

$$m_2 \cos(30^\circ - \phi) - m'_2 \sin \phi = k; \quad (9)$$

$$-m_3 \sin(\phi + 30^\circ) - m'_3 \sin(30^\circ - \phi) = 0; \quad (10)$$

$$-m_3 \cos(\phi + 30^\circ) + m'_3 \cos(30^\circ - \phi) = k, \quad (11)$$

где $m_1 = n_1 - n_0$; $m_2 = n_2 - n_0$; $m_3 = n_3 - n_0$;
 $m'_1 = n'_1 - n'_0$ и т. д.

Решив эти уравнения, получим

$$m_1 = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \sin(\phi + 30^\circ); \quad (12)$$

$$m_2 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \cos \phi; \quad (13)$$

$$m_3 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin(30^\circ - \phi); \quad (14)$$

$$m'_1 = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \cos \phi; \quad (15)$$

$$m'_2 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin(30^\circ - \phi); \quad (16)$$

$$m'_3 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin(\phi + 30^\circ); \quad (17)$$

Таким образом существует бесконечно много схем двухэлементарного счетчика для учета энергии в четырехпроводной сети при симметрии напряжений и неравномерной нагрузке фаз.

К рассмотренной группе относятся счетчики завода „Электроприбор“, тип I_4 , и фирмы Бергманн, тип DZ_4 ($\phi = 90^\circ$); $n_2 = 0$; $n_0 = 0$; $n_1 = -k$; $n_3 = k$; $n'_1 = 0$; $n'_0 = 0$; $n'_2 = -k$; $n'_3 = k$.

Группа 2. Принимая, что к параллельным цепям 1 и 2-го элементов счетчика приложены соответственно напряжения U_1 и $\dot{U}_1 - \dot{U}_2$, значения m_1 , m_2 , m_3 , m'_1 , m'_2 и m'_3 найдем из уравнений (6) — (11), заменив в членах, содержащих m'_1 , m'_2 и m'_3 , угол ϕ на $\phi - 30^\circ$ и умножив эти члены на $\sqrt{3}$:

$$m_1 = -k \sin \phi; \quad (18)$$

$$m_2 = k \cos(30^\circ - \phi); \quad (19)$$

$$m_3 = -k \sin(60^\circ - \phi); \quad (20)$$

$$m'_1 = -\frac{k}{\sqrt{3}} \cos \phi; \quad (21)$$

$$m'_2 = \frac{k}{\sqrt{3}} \sin(30^\circ - \phi); \quad (22)$$

$$m'_3 = \frac{k}{\sqrt{3}} \sin(30^\circ + \phi). \quad (23)$$

К этой группе принадлежит схема счетчика фирмы AEG, тип D_4 ($\phi = 90^\circ$); $n_3 = 0$; $n_2 = 0$; $n_1 = -3k_1$; $n_0 = -k_1$; $n'_0 = 0$; $n'_1 = 0$; $n'_2 = -k_1$; $n'_3 = k_1$.

Группа 3. Принимаем, что для 1 и 2-го элементов использованы соответственно напряжения U_1 и $\dot{U}_1 - \dot{U}_2$, и определяем значения m_1 , m_2 , m_3 , m'_1 , m'_2 и m'_3 из (6) — (11), заменив в этих уравнениях в членах, содержащих m'_1 , m'_2 и m'_3 , угол ϕ на $\phi - 150^\circ$ и умножив эти члены на $\sqrt{3}$:

$$m_1 = -2k \cos(30^\circ - \phi); \quad (24)$$

$$m_2 = 2k \sin(60^\circ - \phi); \quad (25)$$

$$m_3 = 2k \sin \phi; \quad (26)$$

$$m'_1 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \cos \phi; \quad (27)$$

$$m'_2 = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \sin(30^\circ - \phi); \quad (28)$$

$$m'_3 = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \sin(\phi + 30^\circ); \quad (29)$$

Группа 4. При условии, что для 1 и 2-го элементов использованы соответственно напряжения U_1 и $\dot{U}_1 - \dot{U}_3$, значения m_1 , m_2 , m_3 , m'_1 , m'_2 и m'_3 , получим из известной системы уравнений, заменив в них в членах, содержащих m'_1 , m'_2 и m'_3 , угол ϕ на $\phi - 90^\circ$ и умножив эти члены на $\sqrt{3}$:

$$m_1 = 2k \cos(\phi + 30^\circ); \quad (30)$$

$$m_2 = 2k \sin \phi; \quad (31)$$

$$m_3 = -2k \cos(30^\circ - \phi); \quad (32)$$

$$m'_1 = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \cos \phi; \quad (33)$$

$$m'_2 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin (30^\circ - \phi); \quad (34)$$

$$m'_3 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin (\phi + 30^\circ). \quad (35)$$

Группа 5. Принимая, что для 1 и 2-го элементов, 1 и 2 использованы соответственно напряжения $\dot{U}_1 - \dot{U}_2$ и $\dot{U}_3 - \dot{U}_1$. Значения m_1 , m_2 , m_3 , m'_1 , m'_2 и m'_3 найдем из (6) — (11), если заменим в них угол ϕ на $\phi - 30^\circ$ в членах, содержащих m_1 , m_2 и m_3 , и на угол $\phi + 90^\circ$ в членах, содержащих m'_1 , m'_2 и m'_3 , и разделим k на $\sqrt{3}$.

$$m_1 = \frac{2k}{3} \cos (30^\circ + \phi); \quad (36)$$

$$m_3 = \frac{2k}{3} \sin \phi; \quad (37)$$

$$m_3 = -\frac{2k}{3} \cos (30^\circ - \phi); \quad (38)$$

$$m'_1 = \frac{2k}{3} \cos (30^\circ - \phi); \quad (39)$$

$$m'_2 = -\frac{2k}{3} \cos (30^\circ + \phi); \quad (40)$$

$$m'_3 = -\frac{2k}{3} \sin \phi. \quad (41)$$

Погрешности схем при асимметрии напряжений. Зададим приемную часть сети эквивалентной звездой.

Вращающий момент счетчика и мощность, потребляемая сетью, будем рассматривать соответственно как алгебраическую сумму девяти вращающих моментов и трех мощностей, обусловленных тремя последовательностями фаз напряжений и токов. Не останавливаясь на схемах одноэлементных счетчиков, как не имеющих большого практического значения и переходя к схемам двухэлементных счетчиков, замечаем следующее: 1) величины m_1 , m_2 , m_3 , m'_1 , m'_2 и m'_3 выбраны так, что при симметрии напряжений счетчик учитывает энергию правильно; поэтому, при асимметрии вращающий момент счетчика, обусловленный прямой последовательностью фаз напряжений и прямой последовательностью токов, пропорционален мощности прямой последовательности фаз, а моменты, зависящие от прямой последовательности фаз напряжений и обратной и нулевой последовательности токов, равны 0; 2) из уравнений (12) — (17), (18) — (23), (24) — (29), (30) — (35) и (36) — (41) легко убедиться, что для рассмотренных схем $m_1 + m_2 + m_3 = 0$ и $m'_1 + m'_2 + m'_3 = 0$.

Поэтому в каждом элементе полное число ампервитков, создаваемых нулевой последовательностью фаз тока, равно а следовательно, равны нулю и вращающие моменты, обусловленные этой последовательностью фаз тока и прямой, обратной и нулевой последовательностью фаз напряжения.

Таким образом для определения погрешностей достаточно вычислить остающиеся 4 вращающих момента. Мы их будем вычислять для двух случаев: а) наличие искусственной нулевой точки, б) отсутствие ее.

Группа 1

$$a) \Delta = -\frac{3 \{ 2I_{21} [U_{21} \cos (\phi - \varphi_{22}) + U_0 \sin (\varphi_{02} + 30^\circ - \phi)] \cos \phi + I_3 U_0 \cos (I_3 \widehat{U}_0) \}}{P}; \quad (42)$$

$$b) \Delta = -\frac{3 [2U_{21} I_{21} \cos \phi \cos (\phi - \varphi_{22}) + U_0 I'_0 \cos \varphi_{00}]}{P}. \quad (43)$$

Группа 2

$$a) \Delta = -\frac{3 \{ I_{21} \cos \phi [2U_{21} \cos (\phi - \varphi_{22}) + U_0 \cos (\phi - \varphi_{02})] + \frac{3}{2} U_0 I'_0 \cos \varphi_{00} - \frac{1}{2} U_0 I_1 \cos (U_0 \widehat{I}_1) \}}{P}; \quad (44)$$

$$b) \Delta = -\frac{3 [2U_{21} I_{21} \cos (\phi - \varphi_{22}) \cos \phi + U_0 I'_0 \cos \varphi_{00}]}{P}. \quad (45)$$

Группа 3

$$a) \Delta = -\frac{3 \{ 2I_{21} [U_{21} \cos (\phi - \varphi_{22}) + U_0 \sin (\varphi_{02} - \phi + 30^\circ)] \cos \phi + U_0 I_3 \cos (U_0 \widehat{I}_3) \}}{P}; \quad (46)$$

$$b) \Delta = -\frac{3 [2U_{21} I_{21} \cos (\phi - \varphi_{22}) \cos \phi + U_0 I'_0 \cos \varphi_{00}]}{P}. \quad (47)$$

Группа 4

$$a) \Delta = -\frac{3 \{ 2I_{21} [U_{21} \cos (\phi - \varphi_{22}) - U_0 \sin (\varphi_{02} - \phi - 30^\circ)] \cos \phi + U_0 I_2 \cos (U_0 \widehat{I}_2) \}}{P}; \quad (48)$$

$$b) \Delta = -\frac{3 [2U_{21} I_{21} \cos (\phi - \varphi_{22}) \cos \phi + U_0 I'_0 \cos \varphi_{00}]}{P}. \quad (49)$$

Группа 5

$$\Delta = -\frac{3 [2U_{21} I_{21} \cos (\phi - \varphi_{22}) \cos \phi + U_0 I'_0 \cos \varphi_{00}]}{P}. \quad (50)$$

К этой группе относится схема счетчика фирмы Сименс-Шуккерт типа D_{5n} ($\phi = 60^\circ$; $n_1 = 0$; $n_0 = 0$; $n_2 = k_1$; $n_3 = -k_1$; $n'_0 = 0$; $n'_2 = 0$; $n'_1 = k_1$; $n'_3 = -k_1$).

Простейшая из схем с 90° сдвигов между рабочими потоками, принадлежащая этой группе, определяется формулами:

$$n_0 = k_2; \quad n'_0 = -k_2;$$

$$n_2 = 3k_2; \quad n'_3 = -3k_2;$$

$$(n_1 = 0; \quad n_3 = 0; \quad n'_1 = 0; \quad n'_2 = 0).$$

Оценка и выбор схемы. Формулы (42) — (50) позволяют сделать следующие заключения о сравнительных достоинствах схем в отношении наибольшей возможной погрешности, вносимой ими при асимметрии напряжений.

1. В каждой из рассмотренных групп подгруппа наименьшая погрешность свойственна схемам с 90° сдвигом между рабочими потоками.

2. Все схемы с 90° сдвигом между рабочими потоками можно разбить на три группы:

а) Схемы с двумя линейными напряжениями и схемы с искусственной нулевой точкой. Погрешность

$$\frac{U_0 I_0 \cos \varphi_{00}}{P}. \quad (51)$$

б) Схемы без искусственной нулевой точки, в которые входят два фазных напряжения или одно фазное напряжение и одно линейное, смещенное относительно фазного на 30° .

Погрешность

$$\Delta = -\frac{3U_0I_A \cos(U_0I_A)}{P}, \quad (52)$$

где I_A — линейный ток.

в) Схемы без искусственной нулевой точки, в которые входят одно фазное напряжение и смещенное относительно него на 90° линейное напряжение. Погрешность

$$\Delta = -\frac{3\left[\frac{3}{2}U_0I_0' \cos\varphi_{00} - \frac{1}{2}U_0I_A \cos(U_0I_A)\right]}{P}. \quad (53)$$

Из формул (51) — (53) следует, что наименьшую погрешность вносят схемы группы «а».

Если принять ориентировочно, что ток в нулевом проводе равен 35% наибольшего линейного тока, то наибольшая возможная погрешность, вносимая схемами группы «а», в 9 раз меньше наибольшей возможной погрешности для схем группы «б» и «в».

При неравномерности напряжений по фазам $\pm 5\%$, равенстве между собой двух фазных напряжений (при этом условии U_0 достигает наибольшего значения), $I_0 = 0,35I_A$, $\cos\varphi = 0,8$ и $\cos\varphi_{00} = 0,5$ (угол φ_{00} может принимать любые значения между 0 и 360° и, следовательно, $\cos\varphi_{00}$ — любые значения между $+1$ и -1) погрешность, вносимая схемами группы «а», равна приблизительно 0,23%. При той же асимметрии напряжений и симметрии токов ОСТ 6225 допускает изменение погрешности показания на $\pm 2\%$ для счетчиков класса 1 и на $\pm 4\%$ для класса 2.

Таким образом погрешность группы «а» в практических условиях значения не имеет. Так как введение искусственной нулевой точки увеличивает стоимость счетчика, из всех схем группы «а» наиболее приемлемы схемы с двумя линейными напряжениями, а из них — простейшая, определяемая формулами

$$\begin{aligned} n_0 &= k_2; & n_0' &= -k_2; \\ n_2 &= 3k_2; & n_3' &= -3k_2. \end{aligned}$$

В заключение заметим:

1. Значения $m_1, m_2, m_3, m_1', m_2'$ и m_3' для схем с разными парами сдвига фаз между рабочими потоками можно получить из уравнений (6) — (11), заменив в них ψ на ψ' в членах, содержащих m_1, m_2 и m_3 .

2. Возможны схемы с одним линейным или одним фазным напряжением и соединенными параллельно или последовательно параллельными цепями элементов при условии неизменства углов сдвига фаз между рабочими потоками. Значения $m_1, m_2, m_3, m_1', m_2'$ и m_3' для таких схем можно получить из тех же уравнений (6) — (11) при соответствующем их преобразовании.

Счетчики реактивной энергии. Все схемы счетчиков реактивной энергии можно получить из формул для соответствующих схем счетчиков активной энергии, заменив в них угол ψ на $\psi - 90^\circ$. Схемы двухэлементных счетчиков для трехпроводной сети можно получить из формул схем двухэлементных счетчиков для четырехпроводной сети, положивших $n_0 = 0$ и представив их (для удобства) в форме, соответствующей замене ампервитков, создаваемых каким-нибудь током, ампервитками, создаваемыми двумя другими.

Одноэлементные счетчики

Группа 1

$$m_1 = 2k \cos(60^\circ - \psi); \quad m_3 = -2k \sin(30^\circ - \psi).$$

Группа 2

$$m_1 = 2\sqrt{3}k \cos(\psi - 30^\circ); \quad m_2 = 2\sqrt{3}k \sin\psi.$$

Двухэлементные счетчики

1. Четырехпроводная сеть

Группа 1

$$m_1 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \cos(\psi + 30^\circ); \quad m_1' = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin\psi.$$

$$m_2 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin\psi;$$

$$m_2' = \frac{2k}{\sqrt{3}} \cos(30^\circ - \psi);$$

$$m_3 = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \cos(30^\circ - \psi); \quad m_3' = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \cos(\psi + 30^\circ).$$

Группа 2

$$m_1 = k \cos\psi;$$

$$m_1' = -\frac{k}{\sqrt{3}} \sin\psi;$$

$$m_2 = -k \sin(30^\circ - \psi);$$

$$m_2' = \frac{k}{\sqrt{3}} \cos(30^\circ - \psi);$$

$$m_3 = -k \sin(30^\circ + \psi);$$

$$m_3' = -\frac{k}{\sqrt{3}} \cos(30^\circ + \psi).$$

Группа 3

$$m_1 = 2k \sin(30^\circ - \psi);$$

$$m_1' = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin\psi;$$

$$m_2 = 2k \sin(30^\circ + \psi);$$

$$m_2' = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \cos(30^\circ - \psi);$$

$$m_3 = -2k \cos\psi;$$

$$m_3' = \frac{2k}{\sqrt{3}} \cos(\psi + 30^\circ).$$

Группа 4

$$m_1 = 2k \sin(\psi + 30^\circ);$$

$$m_1' = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \sin\psi;$$

$$m_2 = -2k \cos\psi;$$

$$m_2' = \frac{2k}{\sqrt{3}} \cos(30^\circ - \psi);$$

$$m_3 = 2k \sin(30^\circ - \psi);$$

$$m_3' = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \cos(\psi + 30^\circ).$$

Группа 5

$$m_1 = \frac{2k}{3} \sin(30^\circ + \psi);$$

$$m_1' = -\frac{2k}{3} \sin(30^\circ - \psi);$$

$$m_2 = -\frac{2k}{3} \cos\psi;$$

$$m_2' = -\frac{2k}{3} \sin(30^\circ + \psi);$$

$$m_3 = \frac{2k}{3} \sin(30^\circ - \psi);$$

$$m_3' = \frac{2k}{3} \cos\psi.$$

К этой группе относится схема Бергтольда ($\psi = 90^\circ$; $n_0 = 0$; $n_2 = 0$; $n_1 = k_1$; $n_3 = -k_1$; $n_0' = 0$; $n_3' = 0$; $n_1' = k_1$; $n_2' = -k_1$).

2. Трехпроводная сеть

Группа 1

$$p_1 = 2k \cos\psi; \quad p_1' = 2k \sin(30^\circ - \psi);$$

$$p_2 = 2k \cos(60^\circ - \psi); \quad p_2' = 2k \cos\psi,$$

где $p_1 = n_1 - n_3$; $p_2 = n_2 - n_3$; $p_1' = n_1' - n_3'$; $p_2' = n_2' - n_3'$.

К этой группе относится общизвестная схема измерения реактивной мощности двумя ваттметрами активной мощности, по которой фирма Бергманн строит счетчики реактивной энергии ($\psi = 90^\circ$; $n_1 = 0$; $n_3 = 0$; $n_2 = k_1$; $n_2' = 0$; $n_3' = 0$; $n_1' = -k_1$).

Группа 2

$$p_1 = \sqrt{3}k \cos(30^\circ - \psi); \quad p_1' = k \sin(30^\circ - \psi);$$

$$p_2 = \sqrt{3}k \sin\psi; \quad p_2' = k \cos\psi.$$

Группа 3

$$p_1 = 2\sqrt{3}k \sin(60^\circ - \psi); \quad p_1' = 2k \sin(\psi - 30^\circ);$$

$$p_2 = 2\sqrt{3}k \cos(\psi - 30^\circ); \quad p_2' = -2k \cos\psi.$$

Группа 4

$$p_1 = 2\sqrt{3}k \sin\psi; \quad p_1' = 2k \sin(30^\circ - \psi);$$

$$p_2 = 2\sqrt{3}k \sin(\psi - 60^\circ); \quad p_2' = 2k \cos\psi.$$

Группа 5

$$P_1 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin \psi; \quad P_1' = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin(\psi - 60^\circ);$$

$$P_2 = \frac{2k}{\sqrt{3}} \sin(\psi - 60^\circ); \quad P_2' = -\frac{2k}{\sqrt{3}} \cos(\psi - 30^\circ).$$

К этой группе относится схема Бергтольда ($\psi = 90^\circ$; $n_2 = 0$; $n_1 = k_1$; $n_3 = -k_1$; $n_3' = 0$; $n_1' = k_1$; $n_2' = -k_1$), схема Иллюновичи ($\psi = 90^\circ$; $n_1 = 0$; $n_2 = -k_1$; $n_3 = -2k_1$; $n_1' = 0$; $n_2' = -2k_1$; $n_3' = -k_1$) и схема, применяемая фирмой Пауль Мейер ($\psi = 60^\circ$; $n_2 = 0$; $n_3 = 0$; $n_1 = k$; $n_1' = 0$; $n_3' = 0$; $n_2' = -k$).

Погрешность схем при асимметрии напряжений. Погрешности, вносимые схемами счетчиков реактивной энергии, можно определить тем же способом, что и для счетчиков активной энергии. Будут рассмотрены два случая: а) наличие искусственной нулевой точки и б) отсутствие ее:

ними и схемы с искусственной нулевой точкой. Погрешность

$$\Delta = -\frac{3 [2U_{21}I_{21} \cos(\psi - \varphi_{22}) \sin \psi + U_0 I_0' \sin \varphi_{00}]}{P}.$$

Так как введение искусственной нулевой точки удороожает счетчик, — наиболее приемлемы схемы с двумя линейными напряжениями. Что же касается выбора практически и лучшей из этих последних, то он тесно связан с вопросом о необходимой точности измерения реактивной энергии, так как уменьшение погрешности схемы при асимметрии напряжений сопряжено с установлением угла $\psi < 90^\circ$, влечет за собой увеличение потери мощности в счетчике и его стоимости.

На оплату реактивной энергии можно смотреть либо на возмещение убытков, причиняемых абонентом становлением потреблением энергии при $\cos \varphi < 1$ (лишние потери мощности в линии передачи, трансформаторах и генераторах) и невозможность полностью использовать установленные

Группа 1

$$a) \Delta = -\frac{3 [2I_{21} [U_{21} \cos(\psi - \varphi_{22}) + U_0 \sin(\varphi_{02} + 30^\circ - \psi)] \sin \psi + I_3 U_0 \sin(\widehat{I_3} U_0)]}{P}; \quad (54)$$

$$b) \Delta = -\frac{3 [2U_{21}I_{21} \sin \psi \cos(\psi - \varphi_{22}) + U_0 I_0' \sin \varphi_{00}]}{P}. \quad (55)$$

Группа 2

$$a) \Delta = -\frac{3 [I_{21} \sin \psi [2U_{21} \cos(\psi - \varphi_{22}) + U_0 \cos(\varphi_{02} - \psi)] - \frac{1}{2} U_0 I_1 \sin(\widehat{U_0} I_1) + \frac{3}{2} U_0 I_0' \sin \varphi_{00}]}{P}; \quad (56)$$

$$b) \Delta = -\frac{3 [2U_{21}I_{21} \cos(\psi - \varphi_{22}) \sin \psi + U_0 I_0' \sin \varphi_{00}]}{P}. \quad (57)$$

Группа 3

$$a) \Delta = -\frac{3 [2I_{21} [U_{21} \cos(\psi - \varphi_{22}) + U_0 \sin(\varphi_{02} - \psi + 30^\circ)] \sin \psi + U_0 I_3 \sin(\widehat{U_0} I_3)]}{P}; \quad (58)$$

$$b) \Delta = -\frac{3 [2U_{21}I_{21} \sin \psi \cos(\psi - \varphi_{22}) + U_0 I_0' \sin \varphi_{00}]}{P}. \quad (59)$$

Группа 4

$$a) \Delta = -\frac{3 [2I_{21} [U_{21} \cos(\psi - \varphi_{22}) - U_0 \sin(\varphi_{02} - 30^\circ - \psi)] \sin \psi + U_0 I_2 \sin(\widehat{U_0} I_2)]}{P}; \quad (60)$$

$$b) \Delta = -\frac{3 [2U_{21}I_{21} \sin \psi \cos(\psi - \varphi_{22}) + U_0 I_0' \sin \varphi_{00}]}{P}. \quad (61)$$

Группа 5

$$a) \Delta = -\frac{3 [2U_{21}I_{21} \sin \psi \cos(\psi - \varphi_{22}) + U_0 I_0' \sin \varphi_{00}]}{P}. \quad (62)$$

Оценка и выбор схемы. Из формул (54) — (62) следует:

1. Все схемы для трехпроводной сети равнозначны между собой. Погрешность, вносимая ими,

$$\Delta = -\frac{6U_{21}I_{21} \sin \psi \cos(\psi - \varphi_{22})}{P}. \quad (63)$$

2. Из схем для четырехпроводной сети лучшие и равнозначные между собой — схемы с двумя линейными напряже-

мощность), либо просто как на штрафную меру. При обоих взглядах нет смысла стремиться к особо точному учету реактивной энергии.

Поэтому целесообразно в ущерб точности измерения реактивной энергии остановиться на схеме счетчика с минимальным собственным потреблением мощности, наиболее дешевого в изготовлении, удобного в поверке и регулировке и пригодного для трехпроводной и четырехпроводной линий. Всем этим требованиям удовлетворяет схема Бергтольда.

ИСПРАВЛЕНИЯ

В статье Н. Н. Петухова „Обратный ток в металлическом ртутном выпрямителе“ в № 7 „Электричество“ за 1937 г. на кривых плотность обратного тока должна быть выражена

в $\frac{\mu A}{cm^2}$, а не в $\frac{mA}{cm^2}$. На стр. 24 (строчка 16) вместо „диаметр

анода — 26 mm “ следует читать: „диаметр зонда — 26 mm “.

В статье Г. М. Каялова „Определение максимума нагрузки

группы произвольных электротрансформаторов“ в № 9—10 „Эл-

ектричество“ за 1937 г. формулу (11) на стр. 30 следует чи-

тать: $\delta = \frac{P_N}{\lg N}$;

в табл. 1 (стр. 33) значения $n' = 51$ и $n' = 14$

относятся также и к 7 и 9 графикам, в табл. 2 (стр. 34) зна-

чение $n' = 108$ должно быть помещено строчкой ниже и от-

несено ко всем трем графикам для $I_{cp1} = 6,9$, а значение $n' = 27$

должно быть отнесено ко всем трем графикам для $I_{cp2} = 27,8$.

Расчет передачи электроэнергии по железным многопроволочным проводам

Л. П. Лигоцкий
Киев

В ПОСЛЕДНИЕ годы железные многопроволочные провода завоевали в Советском союзе права гражданства в передаче малых мощностей на небольшие расстояния. Мы не считаем этот факт исключительно конъюнктурным явлением и полагаем, что железные провода и в будущем найдут себе применение в передаче энергии.

Методика электрического расчета передачи по железным многопроволочным проводам была однажды автором подробно изложена в журнале «Электричество»¹. В этой статье приведены лишь корректиры к расчетным формулам, полученные опытным путем в последние несколько лет в процессе проектировки и монтажа.

Для облегчения пользования статьей и справок приводим в табл. 1 стандартизованный сортамент проводов (ОСТ 8173/1001).

Таблица 1

Марка провода	Диаметр железной опинкованной проволоки, мм	Временное сопротивление провода, кг/мм ²	Допускаемое отклонение диаметра опинкованной проволоки	Количество проволок в проводе	Теоретическая площадь сечения, мм ²	Расчетный диаметр провода, мм	Расчетный вес 1000-м провода, кг
Ж-35	2,6	60		7	37,2	7,8	290
Ж-50	2,3	60		12	49,5	9,2	395
Ж-70	2,3	60	0,05÷0,11	19	78,8	11,5	630
Ж-95	1,8	70		37	94,0	12,6	750
Ж-120 ₁	1,8	70		49	124,0	16,2	1000
Ж-120 ₂	2,0	70		37	116,5	14,7	925

Выбор наивыгоднейшего напряжения электропроводки при железном проводе производится точно таким же образом, как и в случае медных или монниевых проводов, и мы этого вопроса здесь остановиться не будем.

Рассмотрим формулу, определяющую экономическую наивыгоднейшее сечение железного многопроволочного провода. В своей первоначальной редакции она имела следующий вид:

$$q_{ek} = 5,85 \cdot 10^{-8} I_{max} \sqrt{\frac{(\tau + m\theta I_{max}) C}{B_p}}, \quad (1)$$

где I_{max} — максимальная сила тока в амперах;

$\tau = \int_0^{I_{max}} \left(\frac{I}{I_{max}} \right)^2 dt$ — квадратичное время полных потерь, определяемое по кривым рис. 1;

$\tau = \int_0^{I_{max}} \left(\frac{I}{I_{max}} \right)^3 dt$ — кубичное время полных потерь

(рис. 1);

$m \approx 0,00875$ — коэффициент наклона эквивалентных прямых;

C — отпускная стоимость 1 kW-года в рублях;

$k = 7,5 \frac{\text{м}}{\Omega \text{мм}^2}$ — удельная проводимость (согласно § 5 ОСТ 8173/1001 при постоянном токе R_g не должна превышать $0,133 \frac{\Omega \text{мм}^2}{\text{м}}$);

p — проценты ежегодных отчислений;

B — переменная составляющая стоимости единицы длины линии.

Как показала практика проектирования, формула (1) дает несколько преувеличенное значение экономического сечения провода. Объясняется это тем, что при выводе формулы² действительные кривые отношения R_w/R_g были заменены эквивалентными им прямыми. Согласно опыту проектирования подобных электролиний допустимая плотность тока в таких проводах по соображениям экономическим и электрическим (величины потерь напряжения) колеблется в пределах $0,1 \div 0,4 \text{ A/mm}^2$. В этом диапазоне плотности нагрузки действительные кривые цитированной выше статьи лежат значительно ниже эквивалентных им прямых, что и приводит при рас-

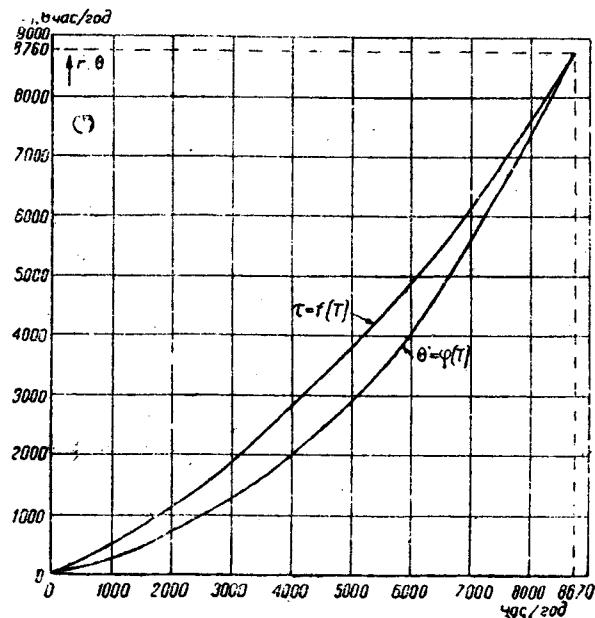


Рис. 1

чете по формуле к несколько завышенным экономическим сечениям по сравнению с получающимися непосредственно при помощи ряда сравнительных подсчетов. На этом основании в формулу внесена поправка, снижающая на 20% значение коэффициента 5,85:

$$q_{ek} = 4,8 \cdot 10^{-8} \cdot I_{max} \sqrt{\frac{(\tau + m\theta I_{max}) C}{kVp}}. \quad (2)$$

Формула (2) совершенно не учитывает длины линии. При сравнительно длинных линиях приходится полученное сечение q_{ek} увеличивать, чтобы иметь допустимую потерю напряжения в проводах, а при коротких, наоборот, уменьшать.

Вообще говоря, получить математически точную формулу для экономически выгодного сечения железного провода весьма затруднительно, так как параметры линии — активное и реактивное сопротивления — есть функции тока проводов. Дать же математическое выражение для функций $R_w = f(I)$ и $X = f(I)$ практически невозможно, так как нет общей закономерности для параметров железных проводов разных марок.

Стоимость одного километра длины линии можно представить в таком виде:

$$A + Bq \text{ [руб/км]},$$

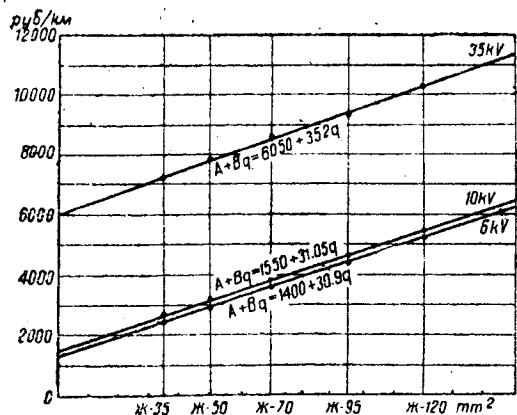
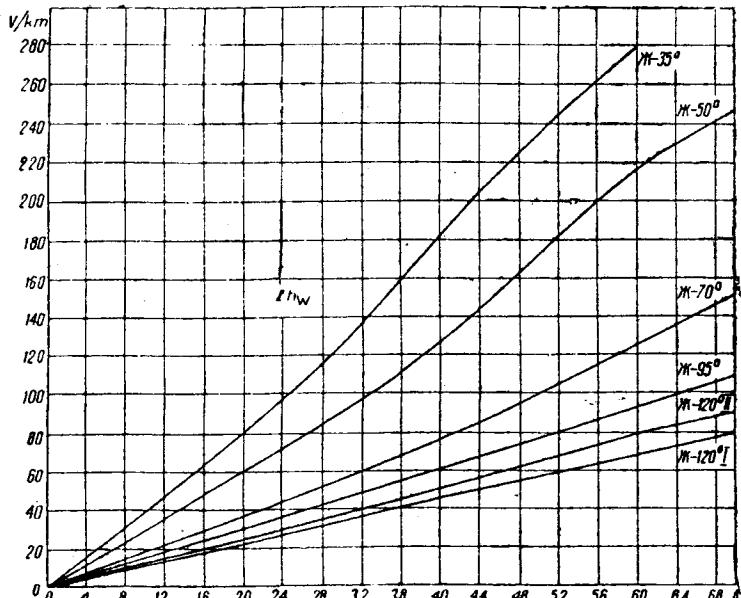


Рис. 2

Рис. 3
Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где — A — постоянная составляющая стоимости
 B — переменная, зависящая от сечения провода.

На рис. 2 представлены прямые стоимости линий, смонтированных на железных многопроводных проводах в зависимости от сечения проводов и напряжения. Построение и подсчет постоянных выполнены при условии прокладки проводов при напряжении 6 и 10 кВ на опорах-стаканах для сечений до Ж-70 включительно и А-образных для сечений Ж-95 и Ж-120. При напряжении 35 кВ опоры для всех сечений расположены П-образными. Анкеровка производится на каждом километре линий.

Приводим средние значения постоянных стоимости одного километра линий.

Таблица 2

Напряжение кВ	A	B
6	1,40	$30,9 \times 10^{-3}$
10	1,55	$31,05 \times 10^{-3}$
35	6,05	$32,2 \times 10^{-3}$

Потеря напряжения в линии определяется обычной формулой:

$$\Delta U = \sqrt{3} (e_r \cos \varphi + e_X \sin \varphi) = \sqrt{3} (IR_w \cos \varphi + IX \sin \varphi) \text{ [V]},$$

где $R \left(\frac{\Omega}{\text{км}} \right)$ — активное сопротивление железных проводов переменному току (определяется по табл. 3, стр. 8173/1001);

$X = X_{вн} + X_{вн} \left(\frac{\Omega}{\text{км}} \right)$ — полное реактивное сопротивление железных проводов (по табл. 4 ОСТ определяется лишь внутреннее реактивное сопротивление провода; внешнее реактивное сопротивление провода определяется подсчетом по обычным формулам, зависящими от диаметра провода и расположения проводов на опоре).

В целях упрощения и облегчения работы проектировщика на рис. 3 даны кривые удельных активных падений напряжений $e_r = IR_w$ [V/km] и на рис. 4 — кривые реактивных падений напряжений

$$e_X = IX = I(X_{вн} + X_{вн}) \text{ [V/km]}.$$

Кривые этих рисунков построены на основании табл. 3 и 4 приложения к ОСТ. При подсчете реактивных падений напряжения в линии внешняя индуктивность принята равной некоторой средней величине для всех сечений. Эта величина колеблется для воздушных линий в пределах 0,36—0,4 Ω /км.

Колебание напряжения в линии определяется обычным путем. Емкостную составляющую

линий с железными проводами ввиду их малой длины нет необходимости учитывать.

Для предварительного выяснения возможности передачи энергии по железным многопроволочным проводам на рис. 5 дана номограмма, построенная для напряжения 10 кВ, при потере напряжения $p = 5-7,5-10\%$ и $\cos \varphi = 0,8$ (согласно новому ОСТ на железные провода).

Поясним на примере, как пользоваться этой номограммой.

Требуется определить, на какое расстояние можно передать мощность 600 кВт по железным проводам марки Ж-95 при $p = 7,5\%$, $\cos \varphi = 0,8$ и напряжении $U = 10$ кВ. Поступаем так: на оси абсцисс правой части номограммы из точки 600 кВт восстанавливаем линию мощности параллельно оси ординат до пересечения с кривой Ж-95 в точке А, затем из этой точки проводим прямую,

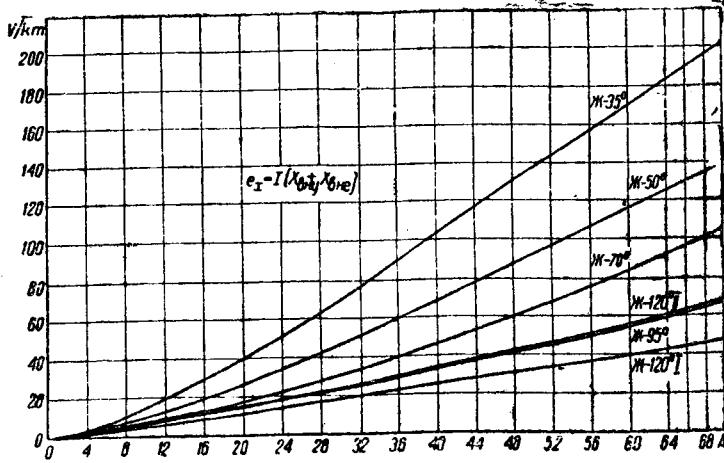


Рис. 4

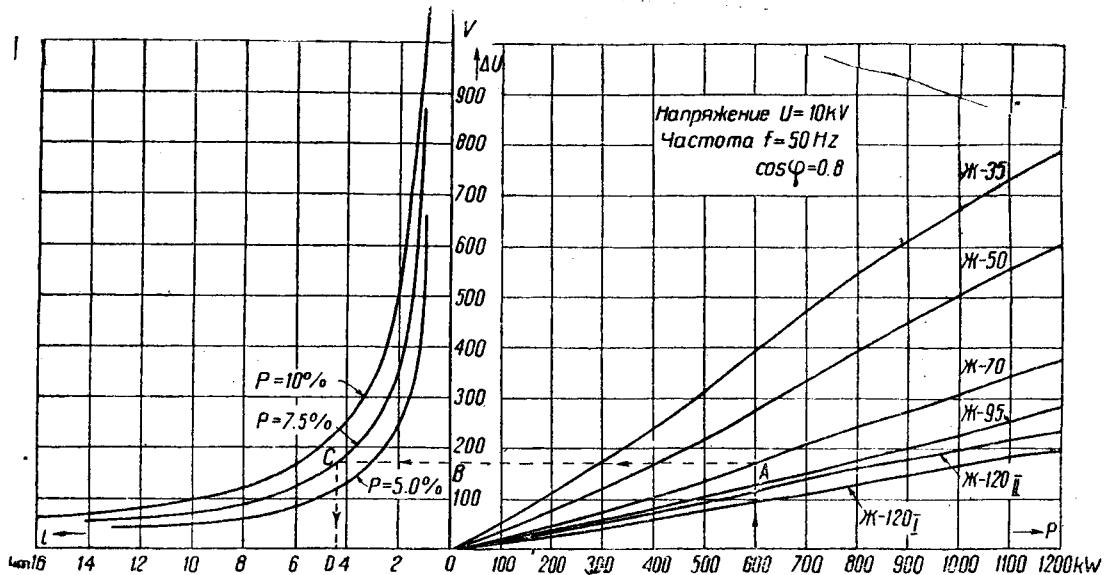


Рис. 5

параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой $p = 7,5\%$ в точке С. Опустив из точки С перпендикуляр на пересечении с осью абсцисс левой части номограммы (точка D), получаем искомую длину $L = 4,45$ км, при удельной потере напряжения $\Delta U = OB = 175$ В/км.

Приведенную на рис. 5 номограмму можно применить также для напряжений 35 и 6 кВ, введя соответственно поправочные коэффициенты 3,5 и 0,6 для значения передаваемой мощности и длины линии (увеличивая или уменьшая цены делений шкал по оси абсцисс левой и правой частей номограммы).

Резюмируя все вышеизложенное, можно рекомендовать такой ход ведения электрического расчета передачи энергии по железным проводам (при заданном напряжении).

1. По универсальной номограмме (рис. 5) определяют возможность осуществления передачи.
2. Определяют экономически наивыгоднейшее

сечение железного провода по формуле (2), при постоянных стоимости B и потерь по рис. 1 и 2, подсчитав предварительно, если он не задан, коэффициент использования максимума нагрузки в линии.

3. Округляют полученное расчетом экономическое сечение провода до ближайшего большего или меньшего сечения согласно табл. 1.

4. Производят расчет на потерю напряжения в линии по формуле (3), пользуясь кривыми рис. 3 и 4, либо табл. 3 и 4 приложения к ОСТ. При неблагоприятном в отношении допустимых потерь напряжения результате следует внести поправку в выбранное экономически сечение, увеличивая или уменьшая, в зависимости от характера результата. Значением емкости электролинии пренебрегают.

5. По мере надобности выполняется поверочный расчет линий на колебание напряжения обычным путем (по максимуму и минимуму нагрузки).

Подсобная номограмма для построения электрических полей с осевой симметрией

А. В. Корсун
Ленинград

В БОЛЬШОМ числе технических задач о конфигурации электрического поля приходится отказываться от аналитических методов исследования (конформные преобразования и т. п.), или ограничиваться применением их к отдельным участкам поля, где форма электродов приближается к простейшей геометрической комбинации. В этом случае участки обычно используются как исходные для графического построения всего поля в остальном пространстве путем последовательных приближений. Графическое построение поля возможно для любых форм электродов, однако, помимо науки и умения правильно представить общую картину поля для заданных электродов, оно требует затраты значительного времени. Особенно трудоемко построение пространственных полей с осевой симметрией, так как в этом случае непрерывное построение на-глаз невозможно и необходима кропотливая поверхка численным расчетом.

Ниже предлагается способ графической поверхки построения, представляющий в сущности воспроизведение обычного поверочного расчета с помощью „слепой“ (не имеющей численных шкал) номограммы и дающий очень большую экономию труда и времени.

При построении поля с осевой симметрией его обычно разбивают на трубы индукции, ограниченные коаксиальными поверхностями вращения таким образом, что диэлектрическое сопротивление отрезка любой такой трубы между двумя любыми соседними поверхностями уровня есть величина постоянная.

Это условие в применении к рис. 1 может быть записано следующим образом:

$$\frac{\bar{ab}}{\epsilon \cdot \bar{cd} \cdot \bar{ef}} = \text{const},$$

где ϵ — диэлектрическая постоянная, или, обозначая длину кольцеобразного отрезка трубы $\bar{ab} = \Delta L$, толщину его $\bar{cd} =$

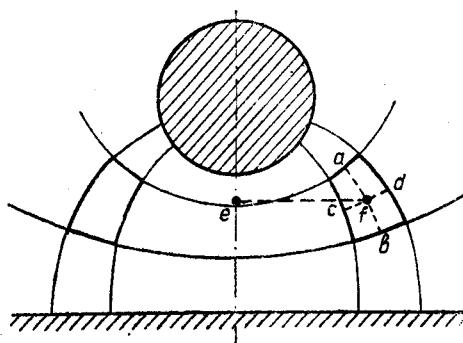


Рис. 1

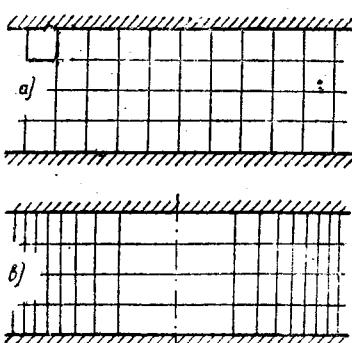


Рис. 2

$= \Delta S$ и средний радиус $\bar{ef} = \rho$,

$$\frac{\Delta L}{\Delta S \cdot \rho} = \epsilon \cdot \text{const.}$$

Не следует забывать, что картина поля, получаемая добным образом, часто имеет не вполне привычный вид, это легко видеть на рис. 2, где изображено поле между бесконечными плоско-параллельными пластинами рассматриваемое в случае рис. 2, а как плоское и в случае рис. 2, б как поле с осевой симметрией.

Расположение поверхностей уровня, разумеется, иначе в обоих случаях.

Соотношение (1) может быть легко изображено с помощью так называемой номограммы с крестообразным трансспарантом (рис. 3). На соответственно перпендикулярных сторонах двух прямых углов при вершинах O и o откладываем отрезки OM , om и on , изображающие в каком-либо масштабе соответственно ρ , ΔL и ΔS (рис. 1). Наложив тем на чертеж кальку с нанесенными на ней двумя перпендикулярными прямыми таким образом, чтобы одна из этих прямых прошла через точку m и n , а другая через точку o , мы отсекаем этой прямой отрезок ON , который послужит нам базой всего дальнейшего построения.

Из подобия треугольников MON и mon :

$$\frac{om}{on} = \frac{OM}{ON}$$

или

$$\frac{om}{OM \cdot on} = \frac{1}{ON}$$

или

$$\frac{\Delta L}{\Delta S \cdot \rho} = \frac{1}{ON},$$

откуда следует, что, располагая крестообразный трансспарант на рис. 3 любым образом, но так, чтобы одна из прямых проходила через точку N , мы всегда засечем на других сторонах координатных углов отрезки, связанные соотношением (1).

Практически номограммы рис. 3 используются при построении поля следующим образом (рис. 4).

Выбираем в рассматриваемом поле одну трубку индукции с пересекающими ее поверхностями уровня, по возможности в том участке, где положение и форма этих поверхностей поддаются расчету или более или менее очевидны. Так например, в пространстве между двумя параллельными круглыми дисками (рис. 4) без большой ошибки можно принять поле вблизи осевой линии равномерным, т. е. вести построение от цилиндрической трубы 123

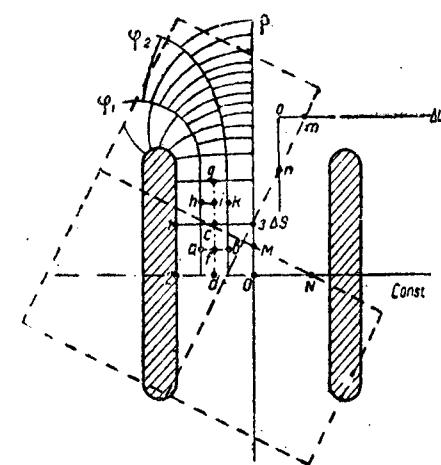
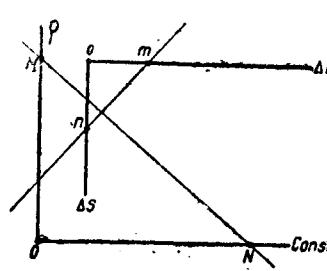


Рис. 4

(в симметричном поле достаточно построение на одной четверти чертежа). Когда исходная трубка индукции таким образом выбрана, то расположение поверхностей уровня за ее пределами намечается на глаз. Затем, где-либо на свободном месте чертежа проводятся координатные оси номограммы ΔL , ΔS , ρ и const , причем никаких численных шкал на осях наносить не нужно. Циркулем переносим на эти оси размеры какого-либо взятого за исходный участка трубки индукции, например размер ab по оси ΔL , cd по оси ΔS и fg по оси ρ .

Затем наложением крестообразного транспаранта, который удобно выполнить в виде листа прочной кальки или целлулоида с нанесенными на нем перпендикулярными прямыми и вырезанной четвертью (прерывистая линия рис. 4) определяем положение точки N . В точку N прочно вкладываем булавку.

Первым этапом построения явится проверка размеров остальных участков исходной трубки индукции, которые должны определяться тем же положением точки N . После этого переходим к построению поля. Ищем положение трубок индукции в промежутке между поверхностями уровня φ_1 и φ_2 , где лежит исходный участок $abcd$. Соседним участком будет отрезок трубки $gchk$. Отмечаем на оси ΔL его предположительную длину (случайно совпадает с точкой m) и, по возможности, расстояние $id = \rho$. После этого накладываем транспарант так, чтобы одна из сторон креста опиралась (в вырезанной четверти) на булавку N и проходила через пометку

на оси ρ , а другая проходила через только что отмеченную точку на оси ΔL , и передвигаем его, проверяя с помощью циркуля окончательные величины ΔL , ΔS и ρ , так чтобы расстояние ρ при соответствующем ΔS и ΔL определило как раз центр i искомого участка $gchk$. Навык в быстром ориентировании транспаранта приобретается после построения нескольких участков и дальнейшая работа идет совершенно автоматически. Не следует смущаться тем, что отдельные участки трубок индукции между разными парами поверхностей уровня не смыкаются между собой.

На рис. 4 изображен результат построения при неправильном выборе поверхностей уровня. Из этого результата совершенно очевидно, в каком направлении должно быть исправлено положение поверхностей уровня. После исправления построение может быть повторено, и, таким образом, путем последовательных приближений картина поля может быть доведена до желаемой степени точности.

Для увеличения точности построения целесообразно строить картину поля в возможно более крупном масштабе.

Если поле строится в неоднородной среде, то при переходе из области с диэлектрической постоянной ϵ в область с другой постоянной ϵ_1 для проверки построения используется вместо точки N другая точка N_1 на той же координатной оси, причем

$$ON_1 = ON \frac{\epsilon}{\epsilon_1}.$$

ХРОНИКА

15 ЛЕТ КАШИРСКОЙ ГРЭС ИМ. Л. М. КАГАНОВИЧА

4 июня 1922 г. Каширская электростанция дала первый ток в Москву. Сооружение этой станции было начато в 1919 г.— в период гражданской войны и жестокой хозяйственной разрухи — по мысли Ленина и находилось под его неослабным вниманием. Постройка Каширской электростанции особенно занимала Ленина потому, что эта станция была одной из тех, строительством которой начиналось практическое осуществление плана Гоэльро.

Сооружение и дальнейшее расширение Каширской электростанции имело своей целью решить две народно-хозяйственные задачи: использовать подмосковный уголь в крупном промышленном масштабе, а также развить и укрепить систему электроснабжения Москвы и района.

Итоги работы Каширгрэс им. Л. М. Кагановича за 15 лет показывают, что эти задачи решены.

Основной итог эксплуатации заключается в том, что доказана полная возможность не только значительного сжигания такого низкосортного топлива, как подмосковный уголь (55—60% баллата), но и получения при этом высоких техно-экономических показателей.

Правда, эта победа далаась нелегко. Коллектив станции упорно боролся за преодоление технических трудностей. В первый период эксплуатации (1922—1924 гг.) подмосковный уголь сжигался в куске, на цепных решетках, приспособленных лишь для сжигания высокосортного топлива.

Начиная с 1925 г., станция производит опыты по применению наиболее рационального и экономичного метода сжигания угля в виде пыли во взвешенном состоянии.

Расширение электростанции в годы первой пятилетки с 36 до 186 MW (по существу постройка новой мощной электротретретрии в 150 MW) уже опиралось на этот новый технический метод. Ежегодно — в 1930, 1931 и 1932 гг. — станция вводила в эксплуатацию по одному турбогенератору мощностью в 50 MW (один из них с первым советским генератором в 50 MW завода «Электросила»).

Следует особенно подчеркнуть, что, помимо таких трудностей как смерзание подмосковного угля, его самовозгорание, сильное зашлакование топок котлов и т. д., связанных с сжиганием этого низкосортного топлива, коллектиству Каширгрэс пришлось ликвидировать добавочные трудности, созданные из-за стачки вредителей.

Вопреки пропискам врагов Каширская греэс из года в год увеличивала выработку электроэнергии. В 1922 г. было произведено 5,2 млн. kWh, в 1923 г. — 32,4 млн. kWh, в 1924 г. — 46,9 млн. kWh и в последующие годы систематически растет поток электроэнергии, вырабатываемой станцией. В 1930 г. в связи с вступлением в эксплуатацию новой мощности кривая выработки электроэнергии дает резкий скачок вверх — 137,1 млн. kWh в 1931 г. также вступает новая мощность, и выработка достигает 398,9 млн. kWh. С пуском в 1932 г. последнего агрегата в 50 MW выработка возрастает до 765,6 млн. kWh и, неуклонно увеличиваясь дальше, достигла в 1936 г. 1365,9 млн. kWh и за январь — май этого года — 573 млн. kWh.

Приведим динамику следующих важных коэффициентов работы Каширской греэс (см. табл.).

Первые месяцы 1937 г. показали дальнейшее снижение удельного расхода топлива (0,532 kg против плана 0,536 kg) и расхода электроэнергии на собственные нужды (7,48% против плана 7,63%).

Таких результатов станция добилась потому, что на ней росли люди, по-большевистски съевшие техникой. И не

Годы	Удельный расход усл. топл. kg на 1 раб. kWh	Расход на собственные нужды, %	К. п. д. станции, %	Годы	Удельный расход усл. топл. kg на 1 раб. kWh	Расход на собственные нужды, %	К. п. д. станции, %
1922	1,526	26,9	5,95	1930	0,799	12,04	13,5
1923	1,486	20,1	6,61	1931	0,671	12,71	16,0
1924	1,211	8,3	9,31	1932	0,659	11,13	16,56
1925	1,108	7,69	10,24	1933	0,613	8,71	17,9
1926	1,119	8,32	10,08	1934	0,595	9,72	18,69
1927	1,043	8,49	10,78	1935	0,560	9,12	19,94
1928	1,082	8,48	10,6	1936	0,540	8,41	20,82
1929	1,015	11,01	10,8				

случайно поэтому коллектив Кггрэс явился одним из инициаторов стахановского движения на электростанциях Союза.

Одна из главных задач, стоящих перед коллективом Каширгрэс им. Л. М. Кагановича, — полная ликвидация аварий. Ни одного перерыва в подаче энергии!

Крупное значение для Кггрэс, сжигающей подмосковный уголь, имеет проблема золо- и сероочистки дымовых газов. Достаточно сказать, что станция выпускает в воздух ежечасно 1,5—2 млн. m^3 дымовых газов, которые засоряют окрестности в радиусе до 7 км.

На Кггрэс сейчас сооружается опытная дымоочистительная установка, которая по приказу наркома тяжелой промышленности т. В. И. Межлаука с 1 августа 1937 г. должна бытьущущена в эксплуатацию. Пустить эту установку в срок — дело чести всего коллектива станции.

Уже сейчас практически назрела необходимость модернизации первой очереди станции. В существующем помещении первой очереди можно без крупных переделок оборудовать установку высокого давления мощностью

75 MW и тогда мощность Кггрэс составит 225 MW. Необходимо также устранить одну техническую нелепость существующую на станции.

Дело в том, что сушка топлива (с 33 до 16% влажности) производится острый (30 at) паром, через редуктор в 3 ат. Эта растраты энергии может и должна быть устранена путем установки турбины с противодавлением мощности в 6 MW. Это, помимо удовлетворения паром потребностей сушки и теплофикации, даст дополнительно ежегодно около 40 млн. kWh.

Последняя и очень важная задача — широкая автоматизация всех элементов технологического процесса и в особенности теплосиловой части.

Коллектив Каширгрэс, подводя итоги своей 15-летней борьбы за новейшую энергетическую базу, вооружившись новыми знаниями, должен и впредь высоко держать знамя ленинско-сталинской электрификации.

И. М. Будницкий

Московский энергетический институт им. В. М. Молотова

БИБЛИОГРАФИЯ

О ДЕФЕКТАХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ДИАГРАММ В УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ

В настоящей заметке автором отмечаются некоторые отступления от теоретических основ электротехники, встречающиеся в нашей учебной литературе по трансформаторам.

Во многих учебниках электрических машин и трансформаторов приводятся обычные векторные и так называемые потенциальные диаграммы трансформаторов не только без должного (т. е. согласного с основами электротехники) единого разреза в обозначении векторов активных и реактивных падений напряжения, но иногда и с принципиально неправильной трактовкой этих падений. На рис. 1 показана обычная векторная, а на рис. 2 — упрощенная потенциальная диаграмма трансформатора при $\varphi_2 > 0$. На обоих рисунках графическое и аналитическое оформление векторов активных и реактивных падений напряжения сделано в полном соответствии с теоретическими основами электротехники. Именно этого оформления и следует единообразно придерживаться при пользовании вышеупомянутыми трансформаторными диаграммами. Между тем учебная литература по трансформаторам оформляет эту часть курсов с большой пестротой, доходящей иногда даже до принципиальных ошибок по отношению теоретических основ электротехники.

Укажем конкретные примеры.

Начнем с того, что в своей книге „Трансформаторы“¹ проф. Л. М. Пиотровский вынужден правильно „констатировать, что договоренности по этому вопросу нет“. Он отмечает, что различные авторы, например, E. Arnold, R. Richler, K. A. Круг, M. Vidmat, придерживаются и различных схем направления векторов, а например Р. Винет совсем не ставит стрелок на векторах. Мы отметим, что схема К. А. Круга вполне правильна. Однако проф. Л. М. Пиотровский все же не придерживается ее, а почему-то предпочитает схему, показанную здесь на рис. 3, по поводу которой он предупреждает читателей, что „принятый нами способ обозначения направления векторов AB, BC, CD и DF на потенциальных диаграммах не является общепринятым“. Но общепринятым аналитическим и графическим обозначением направлений рассматриваемых векторов должно быть только обозначение, обоснованное в теоретической электротехнике и применяющееся ею ко всем без исключения приложениям. Поэтому нет никакой необходимости прибегать в курсах трансформаторов к обозначениям, отступающим от основ электротехники.

В книге проф. Г. Н. Петрова „Трансформаторы“² также имеются графические и аналитические оформления рассматриваемых векторов, аналогичные с только что отмеченными у проф. Л. М. Пиотровского (например, на страницах 13, 17, 18, 23, 30 и др.).

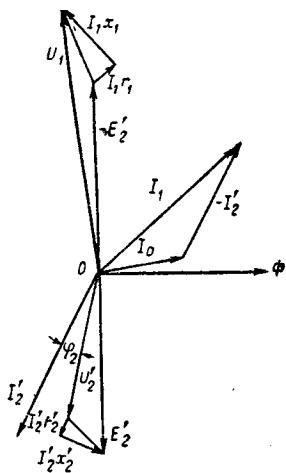


Рис. 1. Векторная диаграмма трансформатора при $\varphi_2 > 0$

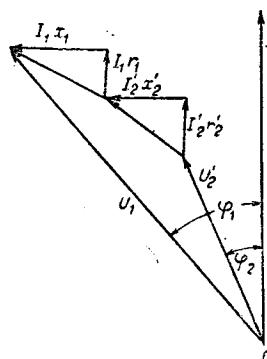


Рис. 2. Упрощенная потенциальная диаграмма трансформатора при $\varphi_2 > 0$

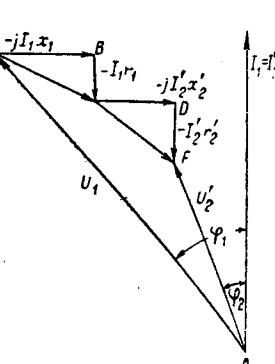


Рис. 3. Другое оформление упрощенной потенциальной диаграммы трансформатора при $\varphi_2 > 0$

Подчеркиваем, что и в учебнике проф. Г. Н. Петрова и в учебнике проф. Л. М. Пиотровского, конечно, нет принципиальных ошибок. Рассматривая рис. 2 и рис. 3, видим, что обе формы потенциальных диаграмм правильно выражают одну и ту же принципиальную сущность. Но в трансформаторных диаграммах эта принципиальная сущность должна оформляться графически и аналитически по методам основ электротехники. Иначе, операции с векторами обратных направлений, сопровождаемыми аналитическими выражениями со знаком минус, вносят сбивчивость и могут привести уже к принципиальным ошибкам. Укажем соответствующие примеры.

В книге проф. В. С. Кулебакина „Испытание электрических машин и трансформаторов“⁸ некоторые (например, см. рис. 28, 1; 28, 7; 30, 1; 30, 2; 30, 3; 30, 4 и др.) векторные и потенциальные диаграммы имеют правильное направление векторов падений напряжения, но неправильные знаки при надписях у этих векторов. В других случаях (например, см. рис. 28, 20; 28, 22) при правильных знаках надписей имеются неправильные направления векторов. В общем же, в обоих случаях имеем ошибочное с точки зрения теоретических основ электротехники толкование падений напряжения в трансформаторах.

Особенно много имеется аналогичных же отступлений от теоретических основ электротехники в книге проф. Ф. И. Холуянова «Трансформаторы однофазного и трехфазного тока»⁴. Здесь также одни диаграммы (например, см. рис. 81) имеют правильное направление векторов падений напряжения при неправильных знаках надписей, другие диаграммы (например, рис. 84, 87, 90, 92, б, 94, 99, 100) при правильных знаках надписей имеют неправильные направления векторов, и сверх того часть диаграммы (например, см. рис. 83, 86, № 92, а) одновременно содержит и то и другое.

В той же книге проф. Ф. И. Холуянова надо отметить и другие дефекты, содержащиеся уже в тексте и вызванные, как кажется, все тем же укоренившимся обычаем не придерживаться единообразных трактовок падений напряжения. Так, на стр. 149 читаем: „нормально вектор падения напряжения в активном сопротивлении направлен против вектора тока“ и затем: „нормально вектор падения в реактивном сопротивлении направлен относительно вектора тока под углом в 90° в сторону запаздывания“. Эти неверные тверждения автора дезориентируют читателей относительно основ теории переменных токов, а именно: векторы, о которых пишет автор книги, направляются согласно теории прямо противоположно тому, как направляет их автор. Между тем, направляя эти векторы неверно, автор утверждает, что это «нормально». Аналогичные же неверные описания диаграмм имеются в этой книге и несколько раньше в стр. 85, 86 и 91. Затем на стр. 87 читаем: « $w_1 \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8}$ —

э. д. с., индукируемая главным потоком; $L_{s1} \frac{di_1}{dt}$ — э. д. с., индукируемая потоком рассеяния первичной обмотки». На самом деле эти два последних выражения означают не электродвижущие силы, а компоненты внешнего напряжения, уравновешивающие соответствующие э. д. с. На стр. 88 аналогичное же смещение делается по отношению выражений $w_2 \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8}$ и $L_{s2} \frac{di_2}{dt}$. На стр. 91 в тексте, относящемся к рис. 83, опять имеется смещение понятий падения напряжения и э. д. с. самоиндукции.

Наконец, отметим еще, что введение Штейнметцем величины $-ir$ как некоторой условной э. д. с., имея свой смысл в некоторых отделах электротехники, не должно, по нашему мнению, распространяться и на описание процесса трансформации. При трактовке выражений $+ir$ и $-ir$ в полном соответствии с основами электротехники выражение $+ir$ означает падение напряжения в активном сопротивлении и только, а выражение $-ir$ означает вычет этого падения из других величин и только. Между тем вошло в обиход приписывать символу $-ir$ значение некоторой э. д. с., якобы имеющей место в процессе трансформации и называемой различными авторами различно. В лучшем случае это только безвредное, но ненужное усложнение, а в худшем случае — источник дополнительных недоумений. Так, в той же книге проф. Ф. И. Холуянова на стр. 85 говорится про «э. д. с., равную падению напряжения в активном сопротивлении обмотки». На стр. 86 говорится: „Рассматривая далее падение напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки, как э. д. с., противодействующую прохождению тока...“. На стр. 87 говорится, что $i_1 R_1$ — э. д. с., заменяющая падение напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки, и дальше аналогично «э. д. с., заменяющая падение во вторичной обмотке $i_2 R_3$ ». К сожалению, хорошая книга проф. Л. М. Пиотровского оперирует с величиной вида $-ir$ как с э. д. с., хотя надобности в этом нет. Автор называет эту величину „электродвижущей силой активного сопротивления“ (стр. 36, 37, 54, 55, 65, 72) и изображает величину $-ir$ как электродвижущую силу вектором (рис. 32 и др.). Мы считаем, что отступающая от основ электротехники трактовка выражения $-ir$, т. е. понимание выражения $-ir$ не как вычет падения напряжения, а как значение некоторой э. д. с., является академически совершенно ненужной и вносит сбивчивость в трансформаторные диаграммы и их описания.

Считаясь с тем, что вся теория трансформаторов и в частности трансформаторные диаграммы и их трактовка имеют большое производственное приложение, полагаем, что все дефекты, отмеченные нами в настоящей заметке, будут устранены в процессе идущего сейчас пересоздания учебников по электротехнике.

С. Н. Шипков

Куйбышевский индустриальный институт

ПИОТРОВСКИЙ Л. М. и ПОПОВ В. К. ИСПЫТАНИЕ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Вып. 1. Испытание трансформаторов и преобразователей. Утв. ГУУЗ НКТП СССР в кач. уч. пособия для энергетич. вузов. Л.—М., ОНТИ. Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 331 стр., 195 рис., 5000,0 руб. с перепл.¹

Рецензируемая книга состоит из двух самостоятельных частей: первая посвящена испытанию трансформаторов, вторая — испытанию вращающихся преобразователей. В первой части, написанной Л. М. Пиотровским, обстоятельно изложены основные вопросы испытания трансформаторов: опыты холостого хода и к. з., методы определения коэффициента трансформации, падения напряжения и к. п. д., нагревание трансформаторов. В этой же части в особую главу выделены вопросы, относящиеся к испытанию трехобмоточных трансформаторов.

Вторая часть составлена В. К. Поповым. Здесь рассмотрены одноякорные и каскадные преобразователи. В соответствии с практическим значением указанных преобразователей большое внимание автором удалено одноякорным преобразователям. В начале второй части даются общие сведения об этих машинах. Затем излагаются способы пуска в ход. Основное место здесь автор отводит

«асинхронному пуску», дополняя рассматриваемую главу автоматической схемой для пуска в ход одноякорного преобразователя фирмы Metropolitan Vickers, что следует признать ценным дополнением. Далее автором изложены вопросы об определении изменения напряжения одноякорного преобразователя, о регулировании его напряжения, о параллельной работе, о работе в качестве обратного преобразователя. В особую главу выделены вопросы об испытании на нагрев, на коммутацию, здесь же рассмотрены некоторые вопросы, относящиеся к нарушениям нормальных условий работы одноякорных преобразователей. К последним относится вопрос о влиянии колебаний напряжения на работу преобразователя, при изложении которого автором использован большой опытный материал, заимствованный из иностранных источников. Последняя глава второй части посвящена испытанию каскадных преобразователей, которые, хотя и не имеют в настоящее время никакого практического значения, но с учебно-методической точки зрения, несомненно, представляют интерес.

¹ По материалам Библиографического сектора Государственной научной б-ки НКТП СССР.

В конце каждой части приведены довольно подробные списки литературных источников как на русском, так и на иностранных языках.

Изложение методов испытания проводится в полном соответствии с правилами и нормами 1Х ВЭС и ОСТ для электрических машин и трансформаторов. Всюду, где это необходимо, даются ссылки на нормы и ОСТ и иногда приводятся выдержки из них.

С методической точки зрения книга составлена весьма удачно, дается не только описание самих опытов и техники их выполнения, но приводится также и краткое физическое обоснование рабочих процессов, имеющих место в трансформаторах и машинах. Таким образом, по-видимому, и должны составляться руководства к лабораторным занятиям студентов вузов.

Изложение вполне соответствует программам по электрическим машинам и трансформаторам энергетических вузов. Авторы во многих случаях удачно иллюстрируют изложение тех или иных методов испытания числовыми примерами, заимствую их из современной практики. Однако имеются некоторые упущения. Так, следовало бы отметить при изложении искусственного метода испытания на нагрев трехфазного трансформатора (метод Густрина на стр. 125—127), что при этом методе возникают иногда значительные потери в кожухе трансформатора, вызванные добавочным потоком, которые особенно заметны при концентрическом расположении цилиндрических обмоток, когда обмотка, включаемая в открытый треугольник, является наружной. Нагрев кожуха в этом случае может сделать испытание трансформатора по методу Густрина практически неосуществимым. Было бы желательно, чтобы в главе о трехобмоточных трансформаторах были даны указания и о параллельной работе этих трансфор-

матов друг с другом и с двухобмоточными трансформаторами (в частности, о группах соединения и об упоминаниях включения на параллельную работу, о влиянии расположения вторичных обмоток относительно первичных).

Во второй части книги при изложении асинхронного пуска в ход одноякорного преобразователя стоило отметить, что замыкание обмотки дополнительных полюсов накоротко во время пуска улучшает не только пусковые характеристики (повышает врачающий момент, устраняет свойство односного включения), но и конфигурацию. Здесь не совсем ясно и точно описан способ применения полярности щеток посредством переключения обмотки возбуждения.

Оформлена книга неплохо и довольно тщательно корректирована, но все же попадаются иногда ошибки: например, неправильно поставлены знаки в уравнениях (4) на стр. 23, неправильно указаны направления векторов — рис. 138 на стр. 235.

Главной из задач, поставленных перед собой авторами, была задача создать учебное пособие для студентов энергетических вузов, проходящих практикум в электромашинной лаборатории. Эту задачу авторы вполне успешно разрешили. Их большой педагогический опыт и умение последовательно и систематически излагать материал сказались в полной мере в рецензируемой книге, которую можно рассматривать как полезное пособие для изучающих электрические машины и трансформаторы. Особенно большую пользу рассматриваемая книга может нести студентам энергетических вузов, для которых она главным образом, и предназначена.

П. С. Сергеев

РЕФЕРАТЫ

W. SCHMID. Метод Кемберленда для борьбы с электролитической коррозией. RGE, № 15, 10/X 1936, стр. 477

Метод этот состоит в поляризации системы при помощи добавочного источника тока. Установка должна содержать не менее двух электродов из различных металлов, погруженных в жидкость и связанных между собой неизменяющимся сопротивлением.

Схематически этот способ может быть представлен следующим образом (рис. 1). Два разнородных металла *C* и *B* погружены в жидкость; *C* и *B* связаны между собой при помощи неизменного сопротивления r_4 , через которое проходит коррозийный ток, вызываемый разностью потенциалов, существующей в этой точке. Для защиты металла *C*, Кемберленд придумал применить третий электрод *A* из того же металла, что и *B*, помещенный в той же жидкости и присоединенный через посредство регулируемого сопротивления r_0 к положительному полюсу источника тока с электродвижущей силой *E*; другой полюс этого источника присоединен к электроду *C*. Ток I_0 в этой последней цепи регулируется таким образом, чтобы он достиг примерно 1 А на 30 m^2 поверхности, подлежащей защите.

Сила тока читается на приборе *H*. С. Г. Розенбаум

Роторидные шкалы, ETZ № 8, 1937

Многие электроизмерительные приборы при помощи соответствующих переключающих устройств охватывают несколько пределов измерений. Такие приборы обычно

имеют одну шкалу и в этом случае для определения истинного численного значения результатов измерений приходится умножать полученный отсчет на множитель соответствующий измеряемому пределу, иногда же прибор имеет несколько шкал, каждая из которых относится к определенному пределу измерений. Таким образом, для определения истинного значения измеряемой величины необходима затрата времени на соответствующий переход, кроме того, появляется возможность ошибки.

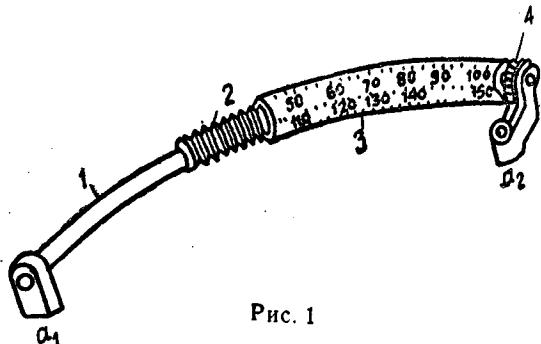


Рис. 1

Для устранения этих недостатков были построены роторидные шкалы с несколькими пределами измерений, всегда показывающие непосредственно измеряемую величину. Как видно из рис. 1, такая шкала состоит из гибкого валика 1, обтянутого складчатой трубкой 2; при вороте трубки посредством зубчатки, укрепленной в ушке 4, под вырез в крышке прибора подводится такая же шкала и одновременно вводится соответствующее добавочное сопротивление или шунт и т. д.

Трубка 2 покрыта оболочкой 3 цилиндрической или призматической формы, на поверхности которой нанесены деления. Трубка 2 укреплена между двумя стойками *a₁* и *a₂*. Роторидные шкалы могут иметь форму полной окружности, что необходимо для работы с круговыми шкалами.

П. П. Храмов

S. H. HEMSLEY. Испытательный трансформатор оригинальной конструкции. The Electrician, 19 марта 1937, стр. 380

В статье описывается большой трансформатор высоковольтной лаборатории завода фарфоровых изоляторов фирмы Нурден в Копенгагене. Основное оборудование лаборатории составляется из следующих агрегатов: трансформаторный каскад из двух трансформаторов на 1500 kV_{эфф} по отношению к земле, мощностью 900 kVA, частоты 50 Hz; мотор-генератор для питания трансформаторов; высокочастотная установка на 1000 kV_{эфф} по отношению к земле при 3000-80 000 Hz; специальная установка для испытания электроизоляционных материалов с наибольшим напряжением по отношению к земле 166 kV мощностью 30 kVA при 50 Hz.

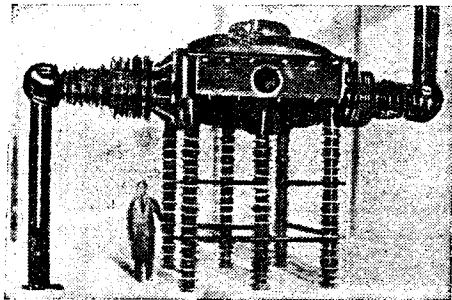


Рис. 1

Описываемый трансформатор — первый из двух трансформаторов каскада — выполнен фирмой Кох и Штерцель. Он имеет мощность 450 kV; его напряжение — 750 kVA. Трансформатор характеризуется малым объемом масла благодаря своеобразным формам и расположению кожуха и маслом в нем. Общий вид трансформатора представлен на рис. 1. Как видно, бушинги трансформатора расположены горизонтально по двум концам кожуха трансформатора. Полная высота трансформатора 10,35 м, полная длина 7,35 м, ширина 3,5 м. Высота опорных изоляторов, на которых укреплен трансформатор, — 2,55 м. Полный вес трансформатора, включая масло и бушинги, составляет 15 800 kg.

Б. М. Тареев

H. B. PALMER. Емкость плоского конденсатора. El. Engng. III, № 3, стр. 363, 1937

Очень часто в практических расчетах приходится учитывать емкость плоского конденсатора. Известная и обычно применяемая формула

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d} \quad (1)$$

учитывает краевого эффекта, и в некоторых случаях действительная емкость оказывается во много раз большей емкости, подсчитанной по формуле (1). Точное значение емкости и точная картина поля могут быть определены методом конформных преобразований. С помощью двукратного отображения искаженное краевым эффектом поле данного конденсатора преобразуется в однородное поле плоского конденсатора. Все преобразования подробно и в достаточноной форме изложены в статье. Окончательный результат выражается через эллиптические функции и может быть сравнительно легко получен с помощью построенной автором кривой зависимости модуля эллиптического интеграла функции от отношения R ширины пластины плоского конденсатора к расстоянию между пластинами. Кривая прилагаемого рисунка дает возможность непосредственно определить точную величину емкости плоского конденсатора из единицы длины для различных значений вышеупомянутого отношения R без того, чтобы нужно было оперировать с эллиптическими функциями.

Кривая 1 дает величину той же емкости, подсчитанной из выражения (1). Для малых значений R , как это следует из сравнения кривых 1 и 2, получается огромное расхождение. Для значений $R > 2$ с достаточной степенью точности можно применять приближенную формулу Бромвича (кривая 2):

$$C = \frac{R}{4\pi} \left[1 + \frac{1}{\pi R} (1 + \ln 2\pi R) \right]. \quad (2)$$

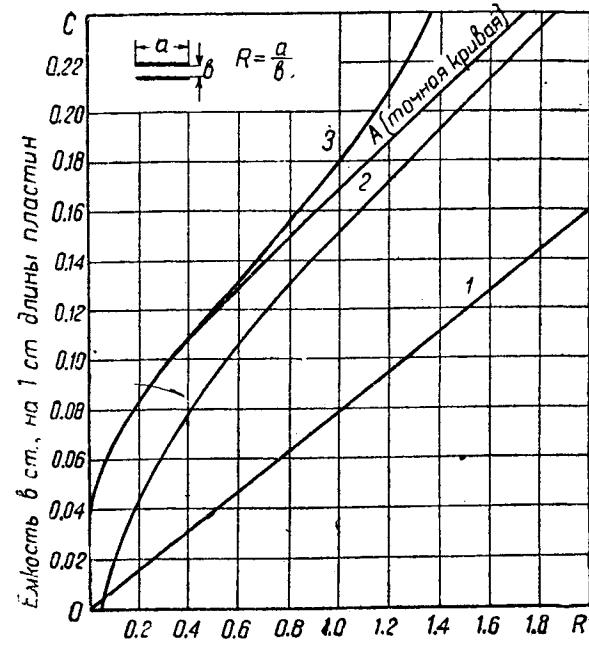


Рис. 1

Для значений $R < 1$ емкость плоского конденсатора получается такой же, как и для двух круглых проводников диаметром, равным половине ширины пластины, разделенных расстоянием (между осями), равным расстоянию между пластинами плоского конденсатора, т. е.

$$C = \frac{1}{4 \ln \frac{4}{R}}. \quad (3)$$

Хотя математического объяснения формулы (3) и не существует, однако, как это видно из сравнения кривой 3, соответствующей формуле (3) с кривой A, для значений $R < 1$ получается удивительное совпадение обеих кривых.

Я. С. Ицхоки

Электромоторы больших скоростей, El. M. № 1, 1937, стр. 9

Согласно сообщению института Франклина в его лаборатории были разработаны и построены два различных типа сверхбыстроходных электрических моторов. Один из них синхронный двухполюсный и двухфазный без возбуждения постоянным током. При частоте тока питания 750 Hz его скорость вращения равняется 45 000 об/мин.

Второй мотор индукционный. Ротор его представляет собой алюминиевый диск толщиной около 76 мкм. Его вал работает в вертикальном положении и поддерживается подшипником. Обмотка статора двухфазная кольцевая, состоит из тонкой стальной ленты, обвитой спиралью на круглых полюсах. Для питания этого мотора был построен специальный генератор, дающий переменный ток частоты 3000 Hz.

В безвоздушной камере скорость мотора была доведена до 75 000 об/мин, при которой алюминиевый диск сломался. В обычной установке при атмосферном давлении скорость этого мотора доходила до 50 000 об/мин. С уменьшением давления окружающего воздуха скорость мотора быстро повышалась. В вакууме скорость мотора достигает 75 000 об/мин в течение 1 мин., считая с момента пуска. Кривая, показывающая изменение скорости мотора в зависимости от времени (с момента пуска в ход до максимальной скорости вращения) в вакууме, близка к прямой линии. При 70 000 об/мин мотор потреблял мощность в 0,5 л. с. Последняя исчисляется, исходя из крутящего момента, выражаемого при любой скорости, посредством формулы:

$$M = J\epsilon,$$

где J — момент инерции ротора и ϵ — угловое ускорение.

Максимальное напряжение в диске указанной формы может быть рассчитано по следующему уравнению:

$$F = \frac{3 + \gamma}{4} \cdot \delta \omega^2 \left(b^2 + \frac{1 - \gamma}{3 + \gamma} \cdot a^2 \right),$$

где γ — постоянный коэффициент Пуассона для материала данного ротора;

ω — угловая скорость диска;

b — радиус диска;

a — радиус отверстия для вала в центре диска;

δ — плотность материала диска.

По состоянию производимых в данное время опытов конструктора полагают, что скорость этого мотора сможет быть доведена до 100 000 об/мин.

И. М. Шварц

E. M. HUNTER. Применение катушек Петерсена в США. GER № 12, 1936

В статье дается детальное технико-экономическое сравнение мероприятий, направленных к поддержанию непрерывности эксплоатации линий электропередач. К ним автор относит: а) двухцепные системы передачи, б) применение заземленных тросов и противовесов, в) применение дейонных разрядников, г) применение катушек Петерсена.

В табл. 1 и 2 приведены данные о стоимости 1 км линии передачи и защищающих ее мероприятий для систем различного рабочего напряжения.

Таблица 1

Линии на металлических опорах

Рабочее напряжение линии кВ	Стоимость одноцепной линии руб.	Стоимость двухцепной линии руб.	Стоимость двух заземленных заземленных тросов руб.	Стоимость протяженных противовесов руб.	Стоимость дейонных разрядников на каждую цепь руб.
66	8 750	11 600	1 100	125—750	710
110	9 400	13 700	1 500	125—750	710
132	10 000	16 300	2 100	125—750	940
154	11 600	19 500	2 600	125—750	—
220	15 000	—	4 400	125—750	—

Таблица 2

Линии на деревянных опорах

22	3 750	6 900	—	—	1 200
33	5 000	9 000	—	—	1 370
44	6 250	11 000	—	—	1 870

Стоимость же катушки Петерсена в среднем составляет около 120 руб. на 1 км защищаемой линии; в более протяженных системах ее применение обходится еще дешевле. Так, одна из недавно установленных катушек обошлась всего в 12 руб. на 1 км линии, на основании изложенного автор делает вывод об экономической целесообразности широкого внедрения катушек Петерсена в системах передачи. Необходимо только отметить, что применение катушек пока что ограничивается напряжением в 140 кВ.

Аварийная статистика показывает, что 70—80% всех аварий на линиях с металлическими опорами — это замыкания на землю. В этих условиях применение катушек дает ряд

технических преимуществ по сравнению с другими мероприятиями, а именно:

а) при замыкании на землю в системах с незаземленной нейтралью они устраниют опасность возникновения междующихся дуг и связанный с этим возможностью подрыва аппаратуры. При наглухо же заземленной нейтралью катушка ограничивает величину тока однополюсного;

б) катушки действуют в течение всего года, устранив замыкания при авариях, обусловленных зимними атмосферными явлениями (снег, ветер, гололед);

в) катушки доводят ток заземления до незначительной величины, благодаря чему устраивается возможность циркуляции воздуха, и дуга гасится весьма быстро. Оба эти факторы уменьшают опасность замыкания на землю других фаз;

г) катушки устраниют посадку напряжения при замыканиях, сохранив неизменным напряжение между фазами.

Зона защиты катушки может меняться в широких пределах, так как данные эксплоатации показывают, что это зависит и при неполной компенсации токов. Совместное применение катушек с противовесами значительно увеличивает эффективность защиты и уменьшает число выключений при грозовых явлениях.

Данные эксплоатации. Шестилетний эксплоатационный опыт работы двух катушек, установленных в системе Consumers Power Company, показал, что 71% заземлений были ими ликвидированы без перерыва эксплуатации.

Катушки, установленные в 33-кВ системе Central Power Company, в течение первых 15 мес. сработали 5 раз также без перерыва эксплуатации.

Учитывая благоприятный опыт их эксплоатации, в установлены 4 катушки в 33-кВ и 6 катушек в 110-кВ системах передачи.

Конструкция катушек. В последние годы получены значительные успехи в конструкции катушек, снабжен только одним бушингом, так как заземленный катушка присоединен к баку.

Трансформатор тока расположен на заземленном кончике мотки, смонтирован внутри бака и только вторичная обмотка выведена наружу. В качестве бушинга применен тиристорный разрядник станционного типа. Последний служит для ограничения резонансных колебаний катушки с емкостью синхронного генератора при коммутационных операциях, а также для защиты катушки от волн перенапряжения, которые могут трансформироваться через силовой трансформатор.

Выбор мощности катушки. Мощность катушки определяется как произведение фазного напряжения на катушку, равного зарядному току системы при заземлении одной фазы. Величина последнего приблизительно равна нормальному фазному зарядному току в системе среднего напряжения и полтора раза — в системах высокого напряжения. Нормальный фазный зарядный ток в амперах на каждые 50 км воздушной линии равен частному отления линейного напряжения в кВ на 10. Зарядный ток больших систем может быть определен сравнением с воздушной линией, а именно: 1 км трехжильного и одножильного кабеля эквивалентен соответственно 25 и 50 км воздушной линии.

В заключение автор указывает, что катушки могут снакомым успехом применяться в системах среднего и высокого напряжений. В каждом отдельном случае выбора или иного защитного мероприятия необходимо произвести технико-экономическое сравнение их. При высоком сопротивлении заземления опор, являющимся причиной из фазных перекрытий при прямых ударах молний в них, стоимость катушки необходимо прибавить стоимость дешевых противовесов.

Ж. В. Толстов

ИЗДАТЕЛЬСТВО ОНТИ

Технический редактор А. П. Александрова

Зав. редакцией Б. М. Тареев

Сдано в набор 7/VII 1937 г.

Подписано к печати 3/VIII 1937 г.

Ответ. редактор: Я. А. Климовид

Стат. формат 226 × 293. Печ. листов 7. У. л.

Уполн. Главлита Б-23135. 1-й Журнальный лист. ОНТИ УНТИ СССР. Москва, Денисовский пер., 30. Заказ. 1481 Тираж 9815.

www.booksite.ru

10% ^{на} _о увеличивается мощность и
снижается расход топлива



При производстве опытов по улучшению нефтяных двигателей, фирма Leyland Motors Ltd. пользовалась индикатором Standard-Sunbury и вот что было сообщено журналу "Leyland Journal" за август 1936 года: "..... из этих результатов следует, что мощность двигателя увеличилась на 10%, в то время как расход топлива снижается примерно на 10% в зависимости от условий работы и типа транспортной машины.....". Подробные данные и иллюстрированные проспекты высылаются по первому требованию.

Standard - Sunbury

Катодный индикатор для быстроходных двигателей

Объявление фирмы STANDARD TELEPHONES & CABLES LIMITED, North Woolwich, London, E.16 (Англия)

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОНТОРА СПРАВОЧНИКОВ И КАТАЛОГОВ НКТП

„Каталогиздат“

Москва, М. Бронная, 4, тел. 3-70-06.

Объявляет подписку на 1937 г.
на технические справочники, каталоги, информации

по сильноточной промышленности

издаваемые Отраслевым Бюро технической информации
Главэнергопрома НКТП (ОБТИ).

ТЕХНИЧЕСКИЕ СПРАВОЧНИКИ:

асинхронные электродвигатели типа АМ,
металлические ртутные выпрямители.

КАТАЛОГИ:

универсальные коллекторные двигатели УМ, низковольтные машины, трансформаторы к металлическим ртутным выпрямителям, контроллеры контактные (крановое электрооборудование), масляные выключатели типа ВМ-35 и др., трансформаторы тока типов ТПОФ, ТЛФ, АТД, ТФН, приводы к разъединителям ручные и моторные, разрядники тиристорные, разные сварочные электромашины, осветительные приборы бытового и промышленного назначения, фотоэлементы.

ИНФОРМАЦИИ:

масляные выключатели типов ВМ-6, ВМ-16, МД-15, кварцевая машина типа АРК-4.

Всего объемом 55 печатых листов.

Издания выходят постепенно и рассылаются подписчикам по мере выпуска. Редакция оставляет за собой право замены одного издания другим.

УСЛОВИЯ ПОДПИСКИ:

- Подписка принимается только на полный комплект 55 лист.
- Стоимость комплекта 40 руб. с пересылкой.
- Деньги полностью вносятся при подписке по адресу:
 - В Москву — ул. Мархлевского, 3, склад изданий Каталогиздата НКТП, или переводятся на текущий счет Государственной конторы Справочников и каталогов НКТП, Москва, Кировское отделение Госбанка № 40004.
 - В Ленинград — канал Грибоедова, 6, Ленинградскому Каталогиздату НКТП, или переводятся на текущий счет отделения конторы, Ленинград, в Центральном отделении Госбанка, р/сч. № 40630.
- В адресе подписчика должно быть сообщено не только подробное (не сокращенное) наименование учреждения, но и указано название отдела, этажа, № комнаты.
- Вследствие ограниченности тиража подписка принимается до 15 августа 1937 г.