

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1951



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

3

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

3
1951
МАРТ

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

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| А. А. Гершун и Д. Н. Лазарев — Вклад академика С. И. Вавилова в советскую светотехнику | 3 |
| М. М. Некрасов — Переход импульсного перекрытия в дугу на линиях передачи с деревянными опорами | 7 |
| М. П. Костенко и Б. Е. Коник — Определение основной и третьей гармоник поля якоря и поля полюсов явнополюсной синхронной машины | 11 |
| А. А. Янко-Триницкий — Уравнения переходных электромагнитных процессов асинхронного двигателя и их решения | 18 |
| В. Ю. Ломоносов — Длинные линии с изменяющимися по длине параметрами | 26 |
| И. Л. Сапир — Расчет переходных процессов в сложных линиях с распределенными и сосредоточенными постоянными | 28 |
| И. И. Кантер — Теория работы многофазных несамоуправляемых инверторов с конденсаторной коммутацией | 33 |
| Д. И. Марьяновский и И. А. Казанцева — Упрощенный расчет дросселей насыщения | 40 |
| М. Н. Губанов — Методика расчета регулирующих дросселей насыщения для стабилизации напряжения выпрямителей | 48 |
| Г. К. Нечаев — Релейный эффект в цепи с термосопротивлением | 53 |
| А. В. Нетушил — Об одном элементарном соотношении в некоторых симметричных потенциальных полях | 58 |
| М. С. Капник — Влияние частоты переменного тока на электрические и световые параметры люминесцентных ламп | 62 |
| А. И. Фюрстенберг — Измерение взаимной индуктивности при частоте 50 гц | 63 |
| ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ | |
| Д. А. Городский — Простой способ численного решения алгебраических уравнений | 65 |
| Я. А. Ибрагимов и Ф. П. Левин — Металлические распределительные устройства 6—10 кв для наружной установки | 66 |
| СТАНДАРТЫ И НОРМЫ | |
| Г. Б. Холявский, Л. К. Грейнер, К. Е. Булгаков — Проект ГОСТ „Аппараты электрические высокого напряжения. Классификация и терминология“ | 68 |
| ДИСКУССИИ | |
| Проект стандарта на номинальные напряжения стационарных электрических сетей | |
| Н. Г. Быков и А. Р. Герштейн | 72 |
| ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ | |
| Исследование сварочной дуги большой мощности в защитной газовой среде. Некоторые вопросы рационального покрытия нагрузки объединения электроэнергетических систем. Осциллографирование коммутации. Исследование грозовых перенапряжений в сельской системе. Продольная емкостная компенсация линий электропередачи (обзор). Новая изоляция для сухих измерительных трансформаторов (обзор). | 75 |
| ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА | |
| Л. Н. Грузов — К статье А. В. Берендеева „О работах Крона“ | 83 |
| ХРОНИКА | |
| В Комиссии по истории физ.-матем. наук АН СССР. Обсуждение книги по автоматизации электропривода. Научно-техническая сессия по электроприводу металлорежущих станков. Совещание по газоочистке. Совещание по вопросам строительства сельских электростанций. Валентин Петрович Вологдин. О конкурсах на соискание премий АН СССР в 1951 г. [А. М. Коган] | 84 |
| БИБЛИОГРАФИЯ | |
| Н. Н. Щедрин — Книга В. А. Веникова „Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике“ | 92 |
| Л. Б. Гейлер — Книга А. Б. Челюсткина и Е. А. Розенмана „Автоматическое управление прокатными станами“ | 94 |
| Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике | 95 |



ВНИМАНИЮ ГОДОВЫХ ПОДПИСЧИКОВ НА ЖУРНАЛ

В марте с. г. годовым подписчикам на журнал „Электричество“ рассылается бесплатное приложение: карманная книжка „Календарь-справочник „Электричество“ на 1951 г. Годовые подписчики, не получившие указанного приложения, должны незамедлительно обратиться в отделения Союзпечати и в почтовые отделения по месту подписки на журнал „Электричество“.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**, доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Бутневич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Глазунов**, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик **В. Ф. Митневич**, кандидат техн. наук **И. А. Сыромятников**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-30.
Адрес для телеграмм: Москва Электричество
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый
ящик № 648

Вклад академика С. И. Вавилова в советскую светотехнику

втор техн. наук, проф. А. А. ГЕРШУН и доктор техн. наук, проф. Д. Н. ЛАЗАРЕВ

Комиссия по светотехнике ОН АН СССР

Научная деятельность покойного академика С. И. Вавилова¹ была настолько обширной, что для достаточно полного ее описания требуется книга, которая несомненно в ближайшем будущем будет написана. С. И. Вавилов внес крупный вклад в развитие советской оптики и техники: им создана новая важнейшая область физической оптики — микрооптика, создана теория люминесценции и под его руководством осуществлялись многообразные ее применения. Мы живимся на значении деятельности академика С. И. Вавилова для развития советской оптики и смежных областей знания.

Будучи в двадцатых годах профессором Московского высшего технического училища, С. И. Вавилов, наряду с курсом физики, читал курс теоретической светотехники. Уже тогда Сергей Иванович высказывал мысль о возможности создания новых источников холодного света, с помощью которого создаваемое ультрафиолетовое излучение преобразовывалось бы при помощи люминесцирующих сред в видимое. Одним из фундаментальных исследований, выполненных С. И. Вавиловым в эти годы, является работа по экспериментальной проверке в широчайшем диапазоне закона фотометрии — экспоненциального закона поглощения света при его прохождении через поглощающую среду. В эти годы уже выделились основные научные задачи С. И. Вавилова. Это — люминесценция, неразрывно связанная с ее теорией совокупности вопросов физической оптики и структуры света. Научные заслуги С. И. Вавилова получают высокое признание: в 32 г. он избирается действительным членом Академии наук и становится во главе физического отдела Физико-математического института Академии наук. Под руководством С. И. Вавилова из небольшой лаборатории вырастает крупный научный институт (Физический институт А. Н. Лебедева Академии наук СССР), который внес в дело развития люминесцентной техники.

В 1932 г. С. И. Вавилов был назначен научным руководителем Государственного оптического института (ГОИ), крупнейшего и неразрывно связанного с оптико-механической промышленностью научного учреждения. Здесь С. И. Вавиловым были выполнены многие из принесших ему всемирную известность исследований, например, по фотолюминесценции растворов, зрительному обнаружению флуктуаций света, обусловленных квантовой его структурой, по природе элементарных излучателей.

Светотехнике С. И. Вавилов придавал всегда большое значение. Один из его докладов в Академии наук СССР был начат словами: «Место науки об освещении, так называемой светотехники, в общей системе наших знаний не всегда понимается с должной ясностью. Роль искусственного света в развитии общества громадна...».

Приводя сведения о миллиардах киловатт-часов, потребляемых в год в Советском Союзе на освещение, и сопоставляя их с низким коэффициентом полезного действия ламп накаливания, С. И. Вавилов приходил к выводу о необходимости изыскания новых путей развития источников света. Подробно анализируя принципиальные несовершенства процессов получения света с помощью температурных излучателей, С. И. Вавилов в своих выступлениях перед светотехниками неоднократно призывал к поискам новых источников света, основанных на явлениях перехода различных форм энергии, в том числе электрической, в световую без посредства тепла. В развитие этих новых и прогрессивных идей С. И. Вавилов лично выполнил ряд ценных для науки и техники исследований. Он возглавлял не только научную, но и организационную деятельность, направленную к созданию новой люминесцентной светотехники. С. И. Вавилов впервые дал строгое определение понятия люминесценции², ввел в науку о люминесценции плодотворные представления об энергетическом и квантовом выходе и доказал энергетическую ценность и высокий коэффициент полезного действия люминесцентных процессов. Он установил фунда-

ментальный для люминесценции закон, связывающий энергетический выход люминесценции с длиной волны возбуждающего света, получивший название закона Вавилова. С. И. Вавиловым и его школой изучаются явления люминесценции растворов, разрабатываются кристаллические люминофоры и изучаются их свойства.

Благодаря этим работам школы С. И. Вавилова и развитию отечественной электротехники, в 1940 г. были выпущены первые отечественные люминесцентные лампы, проложившие новый путь в технике электрического освещения.

На Общем собрании Академии наук СССР 30 мая 1941 г., во время доклада на тему «Люминесцентные источники света»³, С. И. Вавилов впервые демонстрировал серию люминесцентных ламп, изготовленных отечественной промышленностью.

Люминесцентные лампы представляют собою источники света, действие которых основано не на использовании температурного излучения, как у ламп накаливания, а на явлении фотолюминесценции. В трубке, наполненной инертным газом и парами ртути, происходит электрический разряд, сопровождающийся излучением коротковолновой ультрафиолетовой радиации. Эта радиация падает на люминофор, которым покрыта изнутри трубка, и вызывает его свечение. Свет, испускаемый лампой, определяется в основном свечением люминофора. Высокая экономичность люминесцентных ламп и почти неограниченная возможность создания света любого спектрального состава делают эти источники особо ценными.

В другой статье⁴ С. И. Вавилов, рассматривая исторические предпосылки появления люминесцентных ламп, отмечал исключительную роль, сыгранную развитием электротехники. «Только создание современной электротехники, — писал С. И. Вавилов, — поставило на прочную, экономически выгодную основу, проблему получения полноценных, стройных форм энергии, необходимых для возбуждения люминесценции».

Применение люминесцентных ламп потребовало, вместе с тем, выпуска ряда новых электротехнических устройств и значительно большего учета электрических характеристик сети, чем это имеет место в технике освещения лампами накаливания.

Появление первых люминесцентных ламп сразу не принесло заметного сдвига в технике электрического освещения. Война задержала развитие техники и практики люминесцентного освещения. После войны производство люминесцентных ламп было вновь налажено.

В 1944 г. Академией наук СССР по инициативе С. И. Вавилова было создано Первое всесоюзное совещание по вопросам люминесценции. На совещании, наряду с научными докладами, уже тогда были широко представлены многочисленные сообщения о светотехнических приложениях люминесценции: о люминесцентных лампах,

методах световой маскировки, люминесцирующих светотехнических материалах и пр.

В 1945 г. была учреждена Комиссия по люминесценции при Отделении физико-математических наук Академии наук СССР. С. И. Вавилов руководил всеми заседаниями Комиссии, внимательно оценивал выполненные работы и разделял научные задания и поручения. Большое внимание Комиссия по люминесценции уделяла в частности, светотехническим вопросам и пропаганде идей новой светотехники. Доклад на союзном совещании по светотехнике в 1947 г. С. И. Вавилов закончил словами: «Включением можно пожелать, чтобы совместными усилиями физиков, химиков, светотехников и мысленности люминесцентная светотехника СССР возможно скорее вытеснила тепловую светотехнику на второстепенное место. К этому есть принципиальные и технические предпосылки».

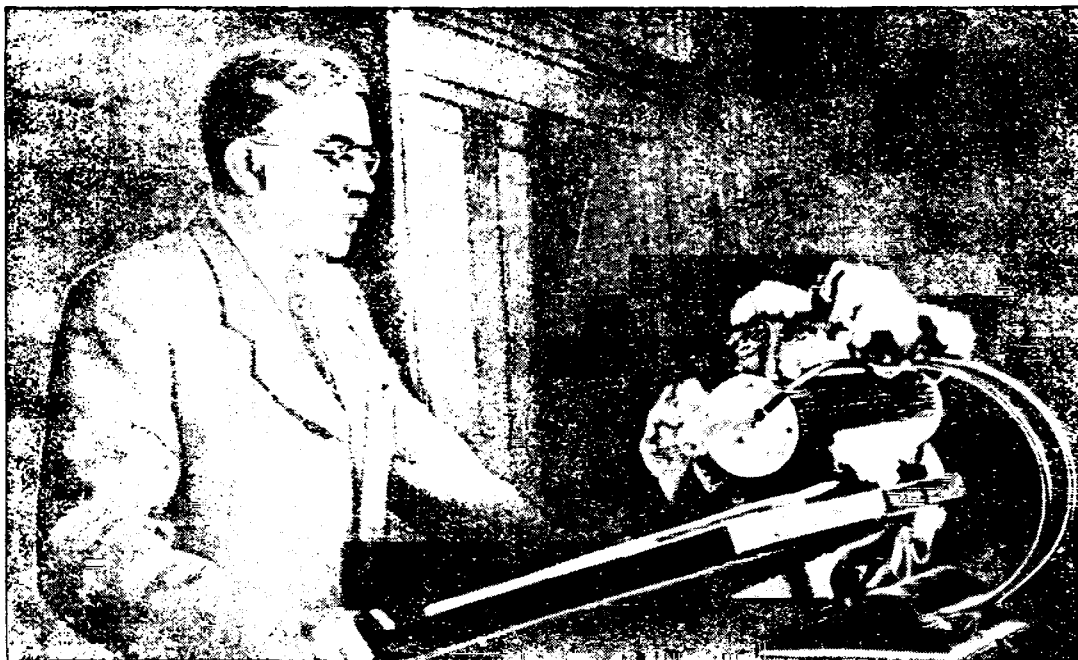
К 1948 г. накопилось большое число теоретических и практических работ по люминесценции, требовавших обсуждения. Второе всесоюзное совещание по вопросам люминесценции и применению светосоставов состоялось в Москве в 1948 г. В докладах Второго совещания большой удельный вес занимали вопросы внедрения в жизнь методов люминесценции. Кроме докладов о производстве люминесцентных ламп, сколько докладов было посвящено применению этих ламп в крупных осветительных и облучательных установках.

По инициативе С. И. Вавилова при Отделении технических наук Академии наук СССР была учреждена Комиссия по светотехнике для координации выполняемых в стране научных работ по светотехнике и консультации научных работников в этой области на предприятиях СССР. С. И. Вавилов поручил руководство Комиссией члену корр. АН СССР, проф. М. А. Шателену, который принял в развитии работ Комиссии деятельное и плодотворное участие. С. И. Вавилов указывал конкретные задачи, которые Комиссия должна была разрешить в ближайшие годы.

Одним из результатов пристального внимания С. И. Вавилова к научным и организационным проблемам в области люминесценции и светотехники явилось быстрое совершенствование производства люминесцентных ламп. За несколько лет был расширен ассортимент, повышено качество и однородность изделий, была увеличена световая отдача источников света. Одновременно с улучшением люминесцентных ламп общего назначения в лабораториях С. И. Вавилова, под руководством, успешно разрабатывались люминесцентные лампы для различных целей и, в числе, лампы, дающие ультрафиолетовую радиацию. Совсем недавно были построены, в частности, новые образцы эритемных или солнечных ламп. В производственных, учебных, общественных и др. помещениях, оборудованных такими осветительными установками, будет только свет. Помещения будут освещаться полезными дозами ультрафиолетовой радиации, восполняющей недостаток солнечного света, особенно важно в северных районах страны

³ Вестник Академии наук СССР, № 7—8, 1941.

⁴ Электричество, № 12, 1947.



Академик С. И. Вавилов выступает с докладом на Всесоюзной научно-технической сессии по светотехнике в июне 1947 г. в Москве.

По инициативе С. И. Вавилова были созданы первые осветительные установки с люминесцентными лампами — в шахтах Донбасса, на станциях Московского метрополитена, в картинных галереях Государственного Эрмитажа, в высотных зданиях и т. д. Приезжая по делам в Ленинград, С. И. Вавилов всегда интересовался состоянием работ в Эрмитаже, посещал картинные галереи, где шли исследования или испытания люминесцентных устройств, участвовал вместе со световедами в выборе спектрального состава света и в установлении норм освещения картин. С. И. Вавилов был большим знатоком редким ценителем произведений искусства. В ноябре 1947 г. в Эрмитаже открылась освещенная люминесцентными лампами галерея картин, а 21 сентября 1949 г. состоялось торжественное открытие для обозрения в вечернее время еще десяти выставочных зал с люминесцентным освещением общей площадью около 100 м². Открытие было приурочено к состоявшейся в те дни сессии Академии наук СССР, посвященной истории русской науки. Члены сессии и приглашенные гости осматривали картинные галереи Эрмитажа, впервые получившие искусственное освещение и открытые в вечернее время. С. И. Вавилов интересовался мнением присутствовавших о восприятии картин при новых источниках света. Освещение картин в Эрмитаже С. И. Вавилов считал «огромным подарком не только всем ленинградцам, но и всему советским людям»⁵.

Значительные практические применения люминесцентных ламп. Светящиеся порошки кристалли-

ческого строения, так называемые кристаллофосфоры, разрабатываются в нескольких лабораториях и производятся для самых разнообразных целей. Они делают доступными наблюдению ультрафиолетовые и инфракрасные лучи, рентгеновские лучи и гамма-лучи, потоки электронов и других частиц. Электронно-лучевые трубки, покрытые кристаллофосфорами, составляют основную принадлежность телевизоров, осциллографических устройств, радиолокационных станций и т. д. Экраны, покрытые светящимися составами, применяются в рентгеновских установках, электронных микроскопах. Все большее значение приобретают для научных исследований, промышленных и других применений электронно-оптические преобразователи. Разнородные приборы с люминесцентными экранами стали предметом массового производства.

Светящиеся составы применяются очень широко и разнообразно: и как средство аварийного освещения, и на объектах местной противовоздушной обороны, и для выявления невидимых глазом трещин в металлообрабатывающей промышленности, и в новых методах архитектурного проектирования, и на театральных сценах, и при съемках в кинематографии. Имеется уже первый опыт создания люминесцентной живописи.

Много сил и внимания отдал С. И. Вавилов в период Великой Отечественной войны применению светящихся составов для нужд обороны. Люминесцентные приемы нашли также широкое применение в приборостроении.

Под руководством С. И. Вавилова в Советском Союзе успешно развивались методы люминесцентного анализа. С помощью этого нового средства научного исследования и контроля решаются вопросы, как относящиеся к строению

⁵ Известия Академии наук СССР. Серия физическая, 1949, № 2, стр. 312.

вещества и структуре химических соединений, так и прикладные задачи большого народнохозяйственного значения. Люминесцентные методы анализа нашли применение в горнорудной, химической и других отраслях промышленности и в сельском хозяйстве.

По вопросам светотехники С. И. Вавилов написал много статей и брошюр, пользующихся большой популярностью и несколько раз переизданных. Брошюры «Глаз и солнце», «Холодный свет», «О теплом и холодном свете» много способствовали распространению светотехнических знаний в нашей стране.

Руководя всеми отечественными работами по люминесценции, постоянно и глубоко интересуясь работами светотехнических лабораторий СССР, оказывая неизменную помощь промышленности, в частности Московскому электроламповому заводу, С. И. Вавилов очень много сделал для практического развития светотехники в СССР.

Свою научную работу Сергей Иванович Вавилов вел до последнего дня своей жизни, руководя одной из важнейших лабораторий возглавлявшегося им Физического института АН СССР — лабораторией люминесценции.

С. И. Вавилов последние годы много думал об организации единой светотехнической промышленности, о создании нового мощного завода люминесцентных ламп, об улучшении освещения Москвы, об учреждении Всесоюзного светотехнического института, об издании большой справочной книги и специального журнала по светотехнике. Обо всем этом часто говорил С. И. Вави-

лов в своих выступлениях в комиссиях Академии наук СССР и в беседах со светотехниками.

Работы Сергея Ивановича, посвященныечению природы света и созданию теории процессов свечения, явились крупным вкладом в нашу физическую науку и светотехнику. Открытый П. А. Черенковым под руководством С. И. Вавилова новый тип свечения, возникающий в движении электронов в веществе со сверхвысокими скоростями представляет важный научный успех в области знаний о природе световых ний. Труды Сергея Ивановича по люминесценции растворов и оптике поглощающей люминесценции среды имеют фундаментальное значение. В законченной в 1950 г. книге «Микроструктура света» С. И. Вавилов подытожил свои многочисленные исследования в области физики и светотехники. За работы в области фотолюминесценции С. И. Вавилову в 1943 г. была присуждена Сталинская премия второй степени. За участие в исследованиях люминесценции, возникающей под действием жесткой радиации гамма — типа, приведших к указанному выше выдающемуся открытию электронного характера нового свечения С. И. Вавилову и его даровитым ученикам в 1946 г. была присуждена Сталинская премия первой степени.

Память о крупнейшем и талантливейшем советском ученом, славном патриоте социалистической Родины, принесшем все свои знания и силы на благо делу развития науки и культуры, делу коммунизма, академиком Сергеем Ивановичем Вавиловым останется навсегда.



Переход импульсного перекрытия в дугу на линиях передачи с деревянными опорами

Кандидат техн. наук, доц. М. М. НЕКРАСОВ

Ивановский энергетический институт им. Ленина

При сравнительно больших расстояниях между электродами потенциал гашения искрового разряда (напряжение зажигания) является напряжением возникновения само-
вольного разряда. Величина его зависит от расстояния между электродами, от их формы и материала, от давления и природы газа. В зависимости от параметров цепи и окружающей среды возникший разряд может или прекратиться, или же перейти в какую-либо другую стадию тлеющего разряда, дуговой). При снижении напряжения до величины напряжения гашения произойдет перерыв или же полное прекращение разряда.

Таким образом, напряжение зажигания и напряжение гашения являются характерными точками вольтамперной характеристики разряда. Напряжение зажигания говорит об электрической прочности данного искрового промежутка, напряжение гашения характеризует нижний предел напряжения, при котором разряд может существовать.

Если разряд происходит в каналах малого сечения (узких порах), то по мере того как он развивается с увеличением тока заполняет отверстия, падение напряжения замедляется, а затем сменяется подъемом напряжения. Напряжение гашения при этом будет тем выше, чем меньше диаметр пор, в которых происходит разряд. Это

Рассматриваются особенности перехода импульсного перекрытия в дугу при протекании разряда по дереву как пропитанному, так и непропитанному. Делается вывод о том, что применение пропитанной древесины не только увеличивает срок жизни опор линий электропередачи, но и делает линии более грозоупорными.

имеет место, например, в порах разрядника Auto-valve.

При разряде вдоль волокон дерева [Л. 1] напряжение гашения также зависит от диаметра

пор (сорта древесины). При разряде вдоль волокон образца сосны длиной $l = 100$ см и образца дуба длиной $l = 50$ см напряжения гашения получаются почти одинаковыми (рис. 1).

Дуговой разряд отличается от искрового большой плотностью тока на катоде, наличием электронной эмиссии, термической ионизацией газа и, как следствие, сравнительно малой плотностью тока в области положительного столба открытой дуги. Сечение открытой дуги увеличивается с увеличением тока, и вольтамперная характеристика обычно получается падающей.

Если дуга горит в щели с изолирующими стенками и ее сечение определяется размерами щели, то может быть получена возрастающая вольтамперная характеристика со значительной величиной напряжения гашения. На рис. 2 приведена вольтамперная характеристика дуги, по-

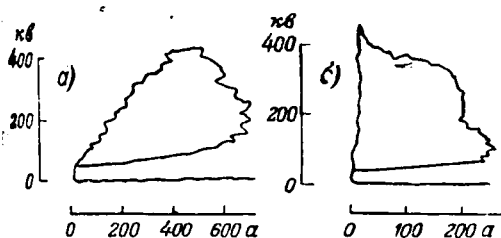


Рис. 1. Вольтамперная характеристика при разряде вдоль волокон.

а — дуб, $l = 50$ см; б — сосна, $l = 100$ см

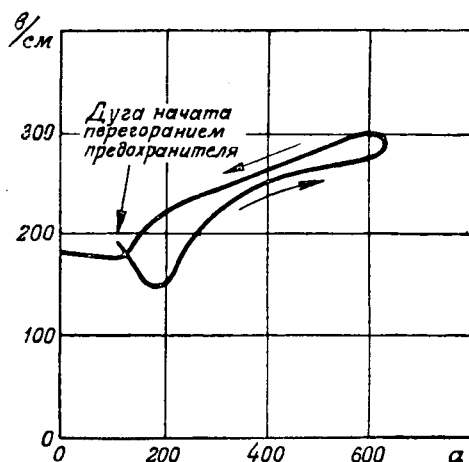


Рис. 2. Вольтамперная характеристика дуги в отверстии жироулавливателя диаметром 0,178 см.

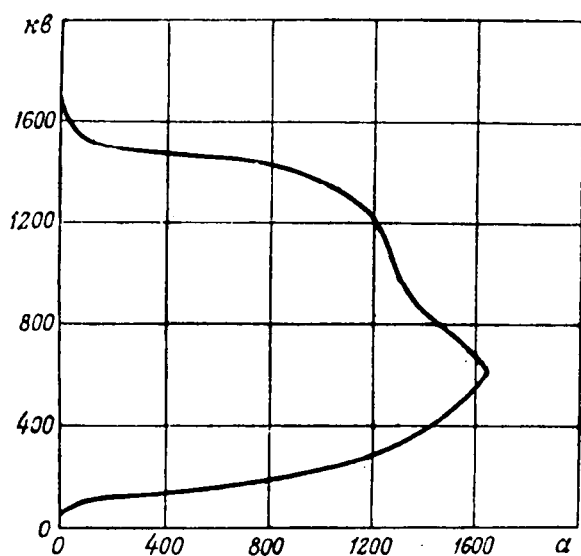


Рис. 3. Вольтамперная характеристика при разряде по поверхности непропитанной деревянной опоры (сосна), $l = 6,25$ м.

лученная в щели из жировика (талько-хлоридовый камень) диаметром 0,178 см [Л. 4]. Стенки щели заметно ускоряют исчезновение ионов во время прохождения тока через нуль. Они адсорбируют заряженные частицы, исчезающие вследствие рекомбинации с частицами противоположного знака. Из-за повышенной рекомбинации прижатый к стенке положительный столб теряет в единицу времени увеличенное число заряженных частиц. В горящей дуге это проявляется в том, что напряженность поля в положительном столбе возрастает.

При импульсном разряде по деревянной опоре дерево раскалывается. Как показали испытания, проведенные в лаборатории им. Смурова разряд идет главным образом по поверхности дерева и ток разряда (при амплитуде до 1600—1700 А) деревом практически не ограничивается. Образец сухого непропитанного дерева при импульсных напряжениях меньше разрядного, пропускает весьма незначительные токи (порядка нескольких ампер при напряжении 1700 кВ на длине 6,25 м). Вольтамперная характеристика деревянной непропитанной опоры (сосна длиной $l = 6,25$ м) приведена на рис. 3, она имеет вид падающей кривой с напряжением зажигания (начала разряда) $U_p = 1725$ кВ и напряжением гашения $U_z = 40$ —45 кВ.

Активная длина образца, пропитанного креозотом, при испытаниях в лаборатории им. Смурова была также первоначально установлена в 6,25 м, но после первых же испытаний была уменьшена до 4,75 м, так как разрядное напряжение пропитанного образца оказалось больше 1750 кВ, напряжение же в условиях испытаний не могло быть поднято выше этой величины.

В пропитанном образце при напряжениях ниже разрядного по дереву протекает довольно большой ток. На рис. 4 приведена вольтамперная

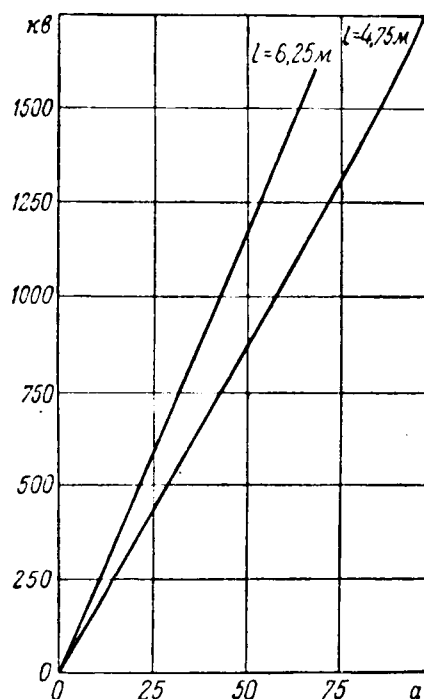


Рис. 4. Вольтамперная характеристика предразрядного тока пропитанного креозотом образца дерева.

характеристика предразрядного тока, которая показывает, что этот ток является обычным ком проводимости при среднем сопротивлении образца 1740—3670 ом/м.

Вольтамперная характеристика разрядов поверхности пропитанного креозотом образца сосны $l = 4,75$ м приведена на рис. 5. Напряжение зажигания для него оказалось равным 1725 кВ; напряжение гашения 75 кВ (значительно выше, чем у непропитанного образца). Осциллограммы тока разряда имеют своеобразную форму (рис. 6). После резкого нарастания наблюдается некоторое уменьшение тока, после чего наступает крутой, но незначительный абсолютной величины подъем тока. Повидимому, когда дерево раскалывается, происходит некоторое ограничение канала разряда и разряд частично идет вдоль волокон внутри дерева. Так и при токах, обусловленных параметрами контура, дерево незначительно раскалывается, то при определенной амплитуде тока разряд распространяется за пределы канала и ток вновь резко возрастает. Это явление интересно было бы рассмотреть при больших импульсных токах.

Наличие значительной величины предразрядного тока способствует лучшему распределению потенциала вдоль бревна и тем самым увеличивает его разрядное напряжение по сравнению с непропитанным образцом.

При сооружении линий передачи высокого напряжения на деревянных опорах применяются как пропитанная, так и непропитанная древесина. Линии передачи напряжением 110 и 35 кВ деревянных опор с полным использованием изоляции дерева нашли большое распространение вследствие дешевизны их и сравнительно

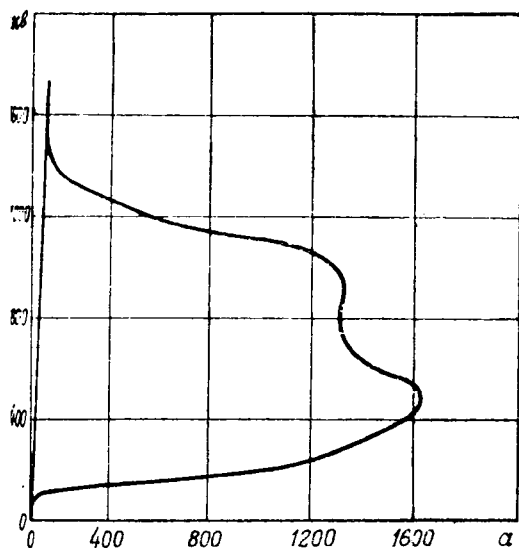


Рис. 5. Вольтамперная характеристика деревянной пропитанной креозотом опоры, $l = 4,75$ м.

жой грозоупорности. Недостатком бестросовых линий передачи на деревянных опорах является то, что при прямых ударах молнии дерево раскалывается. Это в большинстве случаев препятствует дальнейшей работе линии, но способствует более быстрому загниванию древесины. Повреждения, при которых невозможна дальнейшая работа линии (расщепление траверса, падением проводов на землю, пережог проводов, загорание траверса и т. д.), имеют место при ударах в таких же размерах и на линиях, защищенных тросами.

Повышение грозоупорности линий на деревянных опорах без троса связано с изучением явления возникновения силовой дуги вслед за импульсным перекрытием. Экспериментальные данные многих авторов [Л. 5, 6, 7, 8] указывают на критические значения градиентов, при которых возникает дуга. Отмечается также большое значение фазного угла при образовании дуги тока промышленной частоты. По данным Беллаши [8] при градиентах, равных 100 кВ/м, образование дуги мало вероятно, при 20 кВ/м дуга возникает лишь в исключительных случаях, а при 10 кВ/м вообще невозможна.

Некоторые авторы [Л. 10] считают, что большинство работ дает завышенные значения безопасных градиентов, чем это имеет место в действительности. Основанием к этому для них служит ссылка на то, что на линиях с металлическими опорами при градиентах, равных 50 кВ/м, дуга возникает в 70% случаев. По их мнению, образование дуги совершенно реально даже при градиентах, меньших 10 кВ/м, так как иначе невозможно объяснить причины короткого замыкания на линиях 35 кВ с деревянными опорами на междуполюсных расстояниях в $2,5$ — $3,5$ м.

По нашему мнению, данные для линий на металлических опорах нельзя переносить на линии с деревянными опорами, так как при образовании силовой дуги вслед за импульсным пере-

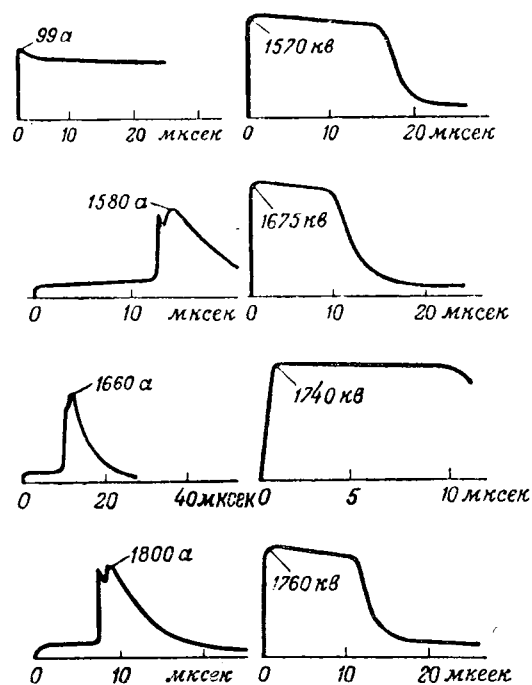


Рис. 6. Осциллограммы разрядного тока и напряжения пропитанного креозотом образца сосны, $l = 4,75$ м.

крытием имеют решающее значение следующие два обстоятельства: 1) величина тока молнии, а следовательно, степень ионизации и величина канала разряда; 2) происходит ли разряд в воздухе или на поверхности дерева. В первом случае (открытая дуга переменного тока) возможность существования дуги определяется ее активной длиной, зависящей от ветра, расположения проводов и других факторов. Градиент, при котором может существовать открытая дуга переменного тока, будет зависеть от силы тока в дуге. Во втором случае безопасный градиент будет зависеть от длины пути разряда по поверхности дерева, от вида древесины и т. д.

Нам известно из рис. 3, что напряжение гашения непропитанного сухого дерева (сосны) при длине образца $l = 6,25$ м равно 40 — 45 кВ. Следовательно, напряжение гашения трехметровой траверсы в случае линии 35 кВ составит 20 — 22 кВ. Вероятность перехода импульсного перекрытия в дугу имеется здесь только при разряде между проводами. Если траверса пропитана креозотом, напряжение гашения траверсы $U_z = 45$ — 47 кВ. Поэтому вероятность перехода импульсного перекрытия в дугу между проводами на линиях 35 кВ с пропитанными деревянными опорами почти полностью исключается. Об этом говорят данные эксплуатации некоторых линий 35 кВ с пропитанной древесиной.

Даже на линиях передачи напряжением 110 кВ, в случае применения пропитанных траверс, вероятность перехода импульсного перекрытия в дугу при разряде между проводами должна быть меньшей, чем при непропитанных траверсах. Также значительно меньшим должно быть число отключений при разряде с провода на землю. Опыт работы различных энергосистем под-

тверждает это положение. Так, при анализе гроз-овых аварий и повреждений за 1939 г. по энергосистемам СССР [Л. 9] было установлено, что из имевших место 14 отключений линий 110 кВ с расстояниями между фазами 3–4,5 м 11 отключений сопровождалось перекрытием изоляции между фазами и между фазами и землей, два отключения — перекрытием на землю, в одном случае характер перекрытия не установлен. Таким образом, большинство отключений линий 110 кВ сопровождается перекрытием изоляции между фазами.

Расхождения между многими авторами в определении градиентов, при которых образуется силовая дуга, объясняется тем, что опыты проводились в различных условиях. При этих исследованиях никто, конечно, не считался с вентиляемыми свойствами дерева не только при разряде вдоль волокон внутри дерева, но и при разряде по поверхности дерева.

То обстоятельство, что дерево опор при гроз-овых разрядах расщепляется, приводит к тому, что дуга возникает в канале древесины. Таким образом, дуга оказывается не свободной, а ограниченной с трех сторон или по крайней мере с одной стороны стенками древесины и для ее поддержания требуется большее напряжение гашения. Соприкосновение дуги со стенками дерева ускоряет исчезновение ионов во время прохождения тока через нуль. Положительный столб тер-яет в единицу времени вследствие повышенной рекомбинации на стенках увеличенное число заряженных частиц.

Равномерное распределение напряжения до разряда в случае древесины, пропитанной креозотом, увеличивает напряжение зажигания (разрядное напряжение), а вместе с тем и напря-

жение гашения. В этом случае дерево рас-лется меньше, но вследствие проводим пропитанного дерева разряд прижимается к поверхности и все процессы, связанные с ор-чением дуги, в пропитанной древесине имеют сто в большей степени.

Следовательно, применение пропитанной весины помимо увеличения срока жизни способствует также увеличению грозоупор-ностей линий передачи на деревянных опорах.

Надо признать безусловно правильным по-ложение В. В. Бургсдорфа [Л. 10] о пр-нении деревянных подкосов с целью увели-чения пути разряда по дереву, во многих случаях пр-отвращающих междуфазное перекрытие по-версе.

Литература

1. М. М. Некрасов и С. Л. Зайенц. Во-досодержание и электрические характеристики дерева. Электричество, № 1, 1937.
2. Н. А. Капцов. Электрические явления в га-зах и в вакууме, ОГИЗ. 1947.
3. А. Энгель и М. Штенбек. Физика и тех-ника электрического разряда в газах, т. I и II, ОНТИ, 1936.
4. А. А. Смуров. Электротехника высокого на-пряжения и передача энергии, т. III, ОНТИ, 1935.
5. В. В. Бургсдорф. Открытые электриче-ские дуги большой мощности. Электричество, № 10, 1948.
6. М. М. Акотис. Развитие грозового разря-да по поверхности дерева. Электричество, № 3, 1941.
7. J. R. Eaton, J. K. Peek, J. M. Dunham. Ex-perimental Studies of Arcing Faults on 75 kV Transmis- sion System. El. Eng., № 11, 1931.
8. P. L. Bellaschi, Wood Pole Line Insulation T-esting. El. Eng., № 7, 1947.
9. Д. В. Шишман. Грозовые поражения лини-й 35 кВ на деревянных опорах без троса. Эл. стан- ции, № 3, 1941.
10. В. В. Бургсдорф. Исследование грозоза-щиты энергосистем, Электричество, № 2, 1949.

[20. 9. 49]



Определение основной и третьей гармоник поля якоря и поля полюсов явнополюсной синхронной машины

Член-корр. АН СССР, проф. М. П. КОСТЕНКО и кандидат техн. наук Б. Е. КОНИК

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Постановка задачи. При расчете параметров явнополюсной синхронной машины особое затруднение представляет определение продольной и поперечной индуктивности якоря и индуктивности обмотки возбуждения. Определение этих параметров связано с необходимостью расчета магнитных полей в воздушном зазоре между стальными поверхностями статора и ротора, созданных м. д. с. статора и ротора.

В общем виде при наличии магнитопровода переменной магнитной проницаемостью μ и сложной форме очертания стальных поверхностей машины аналитическое решение этого вопроса не представляется возможным. Но даже при $\mu = \text{const}$ практически единственно приемлемым методом решения является графическое построение картины поля. Сущность графического метода заключается в том, что путем постепенного выбора вычерчиваются два взаимно ортогональных и удовлетворяющих граничным условиям семейства кривых: семейство силовых линий и семейство линий равного магнитного потенциала, огибающих воздушное пространство, не занятое током, на криволинейные квадранты [Л. 3, 4]. Недостатком этого метода является большая трудность, препятствующая его практическому использованию. Для инженеров, занимающихся расчетом электрических машин, весьма желательны иметь такие зависимости, которые позволили бы легко рассчитать необходимые параметры.

Основными геометрическими величинами, влияющими на пространственное распределение величины поля и его составляющих гармоник, являются ширина полюсной дуги и зазор между полюсным наконечником и расточкой статора. Синхронные машины малой мощности выполняются обычно с равномерным воздушным зазором вдоль полюсного наконечника, но в машинах средней и большой мощности воздушный зазор увеличивается к краям полюсного наконечника для

Рассматривается методика определения гармоник потока якоря и потока полюсов явнополюсной синхронной машины. Приводятся кривые для определения амплитуд основной и третьей гармоник потока.

приближения пространственного распределения поля к синусоиде. С этой целью очертание полюс-

ного наконечника обычно делают по дуге окружности с радиусом, несколько меньшим радиуса расточки статора. Можно принять, что воздушный зазор будет при этом меняться по параболе, проходящей через две заданные точки: максимальный и минимальный зазоры под полюсом $\delta_{\text{макс}}$ и $\delta_{\text{мин}}$ (рис. 1). Таким образом, амплитуда гармоник поля будет зависеть от трех геометрических величин: коэффициента полюсной дуги α , $\frac{\delta_{\text{мин}}}{\tau}$ и $\frac{\delta_{\text{макс}}}{\delta_{\text{мин}}}$. Задаваясь рядом значений этих величин, можно построить семейства кривых для определения амплитуд гармоник полей якоря и полюсов при разных конфигурациях магнитной системы.

Частичное решение этой задачи было дано Рихтером [Л. 3], но это исследование не является систематическим, и результаты его недостаточны для расчетной практики. Значительно более полно эта задача была поставлена Виземаном [Л. 6],

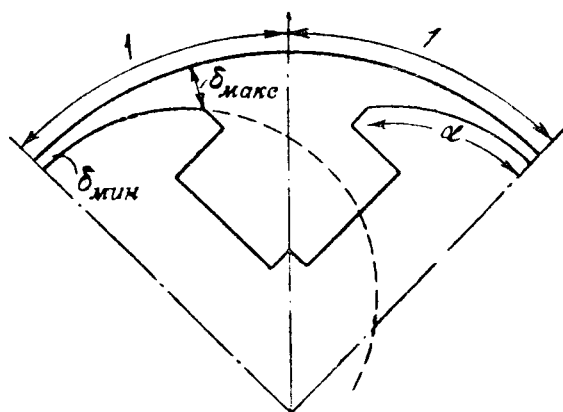


Рис. 1. К заданию конфигурации магнитной цепи явнополюсной синхронной машины.

который предложил ряд семейств кривых для определения основной и третьей гармоник продольного и поперечного полей реакции якоря и поля полюсов.

Для искоемых гармоник поля имеем некоторые зависимости вида:

$$B = f\left(\alpha; \frac{\delta_{\min}}{\tau}; \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}}\right),$$

являющиеся в общем случае поверхностями. Для получения плоских зависимостей можно принципиально поступить следующим образом. Задаваясь одной из переменных, например $\alpha = \text{const} = 0,5$, как это сделано Виземаном, и меняя другие переменные, получим семейство кривых для искоемых величин гармоник для частного значения α , например,

$$B_{\alpha=0,5} = f\left(\frac{\delta_{\min}}{\tau}\right) \text{ при разных } \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const}.$$

Задаваясь затем рядом других значений $\alpha = \text{const}$, можно получить семейства кривых поправочных множителей, например,

$$\left\{ A = \varphi(\alpha) \text{ при разных } \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const} \right\}$$

для разных $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}.$

Умножая на эти поправочные множители величины первого семейства, получим искомые амплитуды гармоник для $\alpha \neq 0,5$:

$$B_{\alpha \neq 0,5} = B_{\alpha=0,5} \times A.$$

Придерживаясь указанной методики, можно получить, следовательно, в общем случае одно семейство кривых для $\alpha = \text{const} = 0,5$ и ряд семейств кривых дополнительного множителя A для различных значений третьей переменной (в нашем примере $\frac{\delta_{\min}}{\tau}$). Семейств кривых для поправочных множителей должно быть, очевидно, столько, сколько интервалов выбирается для постоянных значений третьей переменной. Для достаточно точного решения этого вопроса следует выбирать более узкие интервалы.

Таким путем, но значительно более упрощенно решает Виземан поставленную задачу. Приводимые им кривые, как указывает автор, получены путем построения картин магнитных полей графическим методом для 75 возможных вариантов конфигураций магнитной цепи на основе общепринятых для синхронных машин допущений. Эта работа Виземана легла в основу целого ряда последующих исследований по параметрам синхронной машины [Л. 7, 8] и приводится даже в справочниках. Благодаря этому работа Виземана получила широкое распространение в электромашиностроении и считается как бы классической.

Повидимому, указанным обстоятельством, объясняется то, что работа никогда не подвергалась проверке. Между тем, обращает на себя внимание, что для нмых амплитуд гармоник Виземан приводит в два семейства кривых, а так как при этом он не делает никаких дополнительных допущений, можно предположить, что Виземан принял дополнительный множитель A независимым от третьей переменной. Но тогда кажется непонятным, почему для разных гармоник эта индентная переменная оказывается различной. В одном случае $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}}$, а в другом $\frac{\delta_{\min}}{\tau}$.

Как будет показано ниже, предположение о независимости дополнительного множителя от третьей переменной не соответствует действительности. Очевидно, следует предположить, что Виземан ввел, не оговаривая, семейство кривых A для какого-то среднего значения третьей переменной. Это приводит к принципиально весьма заметной, неточности, величину которой в каждом данном случае еще определить. Некоторые точки кривых Виземана могут быть легко проверены теоретически без необходимости построения картин полей. Так, продолжая кривую Виземана для $\alpha = 0,5$, $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 1$ до пересечения с осью ординат (до $\delta = 0$), получаем точки, которые определяются аналитически. Например для ν -той гармоники продольного поля якоря в долях максимального значения индукции в середине полюса имеем:

$$B_{d\nu} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin\left(\frac{\nu-1}{2}\right)\alpha\pi}{\nu-1} + \frac{\sin\left(\frac{\nu+1}{2}\right)\alpha\pi}{\nu+1} \right].$$

Точно так же для ν -той гармоники поперечного поля якоря в долях максимального значения индукции при равномерном зазоре получаем:

$$B_{q\nu} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin\left(\frac{\nu-1}{2}\right)\alpha\pi}{\nu-1} - \frac{\sin\left(\frac{\nu+1}{2}\right)\alpha\pi}{\nu+1} \right].$$

Кривые Виземана в большинстве случаев значительно расходятся с указанными предельными точками, рассчитанными согласно приведенным выражениям.

Все указанные обстоятельства приводят к сомнению в правильности кривых Виземана. Это сомнение вызвали необходимость детального исследования данного вопроса. Результаты исследования, в большинстве случаев расходящиеся с результатами Виземана, приводятся в настоящей работе.

Методика анализа, принятая в предлагаемой работе, может быть использована при решении ряда аналогичных вопросов. Полезно остановиться на ней несколько подробнее, предварительно уточнив исходные положения.

более полезно в силу принципиального характера затронутого вопроса.

Допущения. В соответствии с Виземаном новую анализа положены следующие общие допущения: 1) пренебрегаем насыщением магнитопровода; 2) м. д. с. статора принята синусоидально (косинусоидально) распределенной в пространстве; 3) полюсная дуга очерчена по дуге окружности.

Увеличивая трудоемкость поставленной задачи, связанная с массовым построением картин магнитных полей, привела к необходимости разработки методики, упрощающей анализ, при сохранении практически приемлемой точности. Методика связана с некоторыми дополнительными допущениями, и они будут оговорены особо в каждом конкретном случае.

Методика определения поля в воздушном пространстве между поверхностями статора и ротора. В основу анализа положен графический метод построения картин полей в воздушном пространстве между поверхностями статора и ротора.

Опыт построения полей показал, что результаты практически не зависят от числа полюсов. Этот вывод совпадает с соответствующим указанием Рихтера [Л. 3]. Поэтому все картины полей нами построены для случая бесконечного числа полюсов, т. е. для спрямленного статора.

Понимая, что у Виземана никаких указаний на этот счет не имеется. Дальнейшие детали методики несколько различаются для составляющих поля якоря по продольной и поперечной осям и для полюсов, поэтому рассмотрим их отдельно.

Продольное поле якоря. Реальное магнитное поле в воздушном пространстве между стальными поверхностями статора и ротора рассматривается как состоящим из двух частей: поля между полюсами и поля в воздушном зазоре под полюсным наконечником. Определение каждой составляющей имеет свои особенности.

Поле между полюсами определяется графическим методом. При этом, как показал опыт построения полей, результат практически не зависит ни от формы полюсного башмака, ни от очертания полюсной дуги. Поле в этой области зависит только от распределения м. д. с., ширины полюсной дуги и максимального зазора у края полюса. Поэтому все картины полей в междуполюсном пространстве были построены для случая бесконечно высокого полюсного башмака и равномерного воздушного зазора под полюсной дугой. Индукция в каждой точке поверхности якоря определяется в долях максимальной индукции под серединой полюса. Последняя же определяется как величина, обратно пропорциональная максимальному воздушному зазору под серединой полюса. Найдя амплитуду γ -той гармоники $B_{0\gamma}$ поля у поверхности якоря в междуполюсном пространстве при одном минимальном зазоре с $\delta_{\min} = p_1$, легко можно определить соответствующую

зазоре с $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = p_2$, пользуясь простым соотношением

$$B'_{0\gamma} = B_{0\gamma} \cdot \frac{p_1}{p_2}. \quad (3)$$

В нашем частном случае было взято $p_1 = 1$. Иными словами, одна и та же картина поля в междуполюсном пространстве при заданном распределении м. д. с. имеет масштаб, определяемый величиной магнитного зазора под серединой полюса. Меняя этот минимальный зазор, мы переходим к новому масштабу для той же картины поля.

При определении второй части поля в воздушном зазоре под полюсным башмаком магнитную проводимость в этой области можно принять с большой точностью как величину, обратно пропорциональную воздушному зазору. При принятом очертании полюсной дуги величина этого зазора может быть принята изменяющейся по параболе, проходящей через две заданные точки: $\frac{\delta_{\min}}{\tau}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\tau}$, что может быть выражено в виде уравнения [Л. 5, 8]

$$\frac{\delta}{\delta_{\min}} = 1 + \frac{p-1}{\alpha^2} \left(\frac{2x}{\tau} \right)^2, \quad (4)$$

где x — координата точки, отсчитываемая от середины полюса;

α — коэффициент полюсной дуги — отношение ширины полюса к полюсному делению τ ;

p — отношение максимального зазора под полюсом к минимальному. Тогда для индукции под полюсом получается следующее выражение:

$$\frac{B}{B_{80}} = \frac{\cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2x}{\tau} \right)}{1 + \frac{p-1}{\alpha^2} \left(\frac{2x}{\tau} \right)^2}, \quad (5)$$

где B — индукция в точке с координатой x ;

B_{80} — максимальная индукция под серединой полюса.

Из сказанного следует, что при заданном коэффициенте полюсной дуги α мы принимаем конфигурацию междуполюсного пространства не влияющей на поле под полюсом. Как показал опыт построения подобных полей, это допущение практически хорошо выполняется, в чем можно также отчасти убедиться из рассмотрения примера электрического поля плоского конденсатора с ограниченными пластинами [Л. 2].

Разлагая выражение (5) в ряд, находим искомыми амплитуды гармоник поля от составляющей поля под полюсом.

Амплитуда γ -той гармоники продольного поля якоря может быть найдена суммированием составляющих гармоник от поля междуполюсного пространства и от поля под полюсным наконечником:

$$B_{\gamma} = B'_{0\gamma} + B_{\gamma} = B_{0\gamma} \frac{p_1}{p_2} + B_{\gamma}. \quad (6)$$

Интересно отметить предельный случай, когда минимальный зазор под полюсом равен нулю. Тогда поле между полюсами становится бесконечно малым по сравнению с полем под полюсом, распределение которого в этом случае в точности соответствует выражению (5). Для этого случая $B_z = B_{\delta}$. В еще более частном случае при постоянном воздушном зазоре под полюсом, равном нулю, получаем для амплитуд гармоник B_n уже приведенное нами ранее выражение (1). Таким образом, пользуясь выражениями (1) и (5), можно легко проверить все крайние точки кривых Виземана для продольного поля якоря, без необходимости построения картин полей.

Поперечное поле якоря. Все сказанное о продольном поле якоря остается в силе и для поперечного поля, за исключением некоторых деталей.

Выбирая попрежнему начало отсчета координаты x на оси полюсов, можно индукцию под большей частью полюсного башмака с достаточной точностью выразить в виде:

$$\frac{B}{B_0} = \frac{\sin \frac{\pi}{2} \left(\frac{2x}{\tau} \right)}{1 + \frac{p-1}{a^2} \left(\frac{2x}{\tau} \right)^2}, \quad (7)$$

где B_0 — условная величина максимальной индукции по поперечной оси полюсов, которая была бы при равномерном зазоре равном действительному минимальному зазору под серединой полюса.

Лишь на краях полюсных наконечников имеет место отступление от этой закономерности вследствие значительного искажения поля. Это объясняется тем, что полюсный башмак в этом случае находится в зоне значительной тангенциальной составляющей напряженности поля. Для учета этого обстоятельства картина поперечного поля якоря между полюсами продолжалась в область воздушного зазора под полюсным башмаком до того места, где результат получался практически таким же, как и из выражения (7).

Опыт построения этих полей показал, что одну и ту же картину поля для заданных значений a и $\frac{\delta_{\max}}{\tau}$ удавалось продолжить под по-

люсными башмаками с разными значениями $\frac{\delta_{\min}}{\tau}$.

При этом основная картина поля между полюсами оставалась неизменной, с незначительными изменениями только в непосредственной близости от края полюсного башмака. Это еще раз подтверждает практическую независимость поля между полюсами от очертания полюсной дуги.

Как и для продольного поля якоря, в предельном случае $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = 0$ поле между полюсами становится бесконечно малым по сравнению с полем под полюсом, распределение которого в этом частном случае в точности соответствует выражению (7). В еще более частном случае, при постоянном воздушном зазоре под полюсом, равном

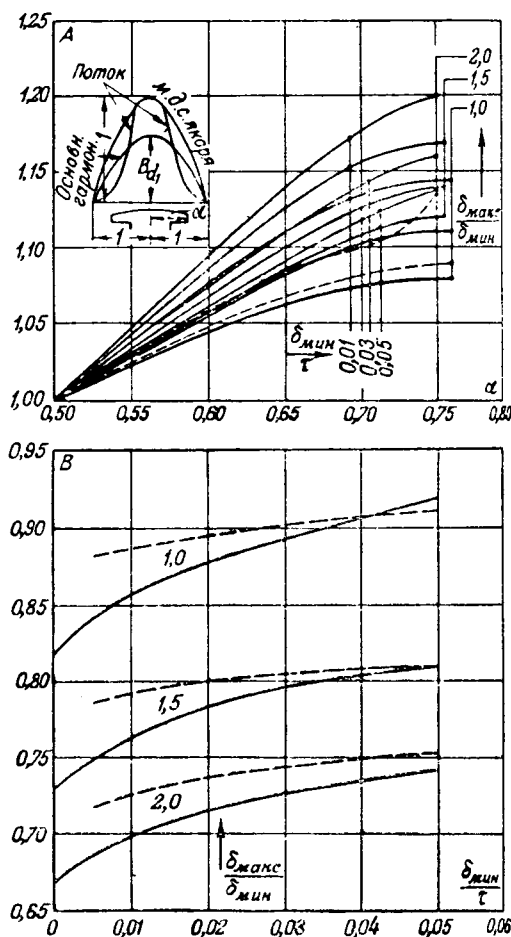


Рис. 2. Кривые для определения амплитуды основной волны потока якоря по продольной оси полюсов. $B_{d1} = B \times A$.

нулю, получаем для амплитуд гармоник B_n приведенное нами выше выражение (2). Таким образом, выражения (2) и (7) дают возможность легко проверить крайние точки всех кривых Виземана для поперечного поля якоря.

Поле полюсов. Для полюсов также остаются в силе все основные положения, указанные для продольного поля, и лишь требуются некоторые дополнительные уточнения.

Следует учесть, что междуполюсное пространство в значительной мере заполнено обмоткой возбуждения, где $\text{rot } \mathbf{H} \neq 0$, поэтому непосредственно вышеуказанный графический метод построения поля неприменим. В этом случае картина поля между полюсами может быть сравнительно просто построена, если заменить реальную обмотку возбуждения эквивалентным витком, надлежащим образом расположенным на полюсе [Л. 9]. Вблизи поверхности, где поле нас в основном интересует, распределение поля с большой степенью точности соответствует истинной картине поля. Пользуясь этим приемом, были построены картины поля в междуполюсном пространстве.

Магнитная проводимость под полюсным башмаком может быть принята в этом случае с большей точностью, чем для продольного поля якоря, величиной, обратно пропорциональной

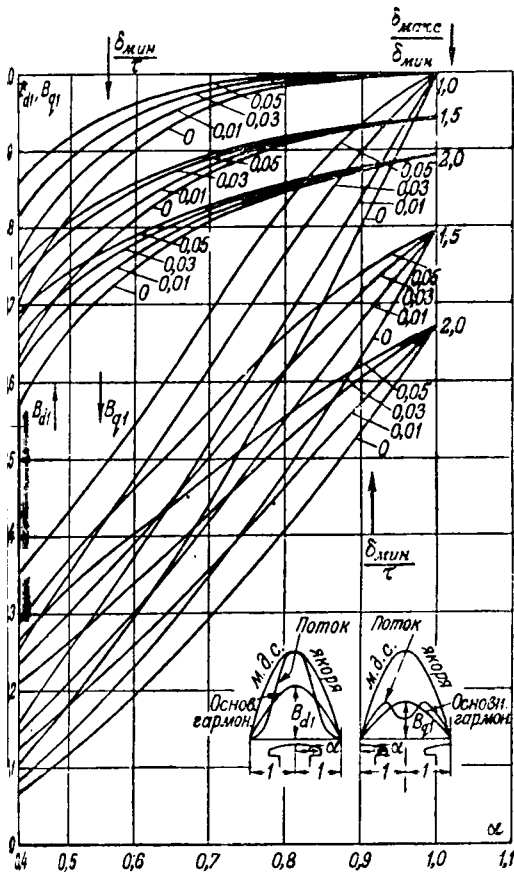


Рис. 3. Кривые для определения амплитуды основной гармоники продольного поля якоря B_{d1} и поперечного поля B_{q1} для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const}$.

воздушного зазора [Л. 5]. Тогда индукция полюсным башмаком определяется в виде:

$$\frac{B}{B_{\infty}} = \frac{1}{1 + \frac{p-1}{\alpha^2} \left(\frac{2x}{\tau} \right)^2}, \quad (8)$$

B_{∞} — максимальная индукция под серединой полюса.

В предельном случае $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = 0$ поле в промежуточном пространстве становится исчезающе малым по сравнению с полем под полюсом, распределение которого при этом в точности соответствует выражению (8). Поэтому выражение (8) может быть использовано для проверки точек кривых Виземана для поля полюсов.

Результаты анализа. На основе изложенной методики было проведено весьма обширное исследование магнитных полей якоря и полюсов. Полученные результаты приводятся нами для значений α , $\frac{\delta_{\min}}{\tau}$, $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = p$, лежащих в пределах, которые укладываются все выполняемые

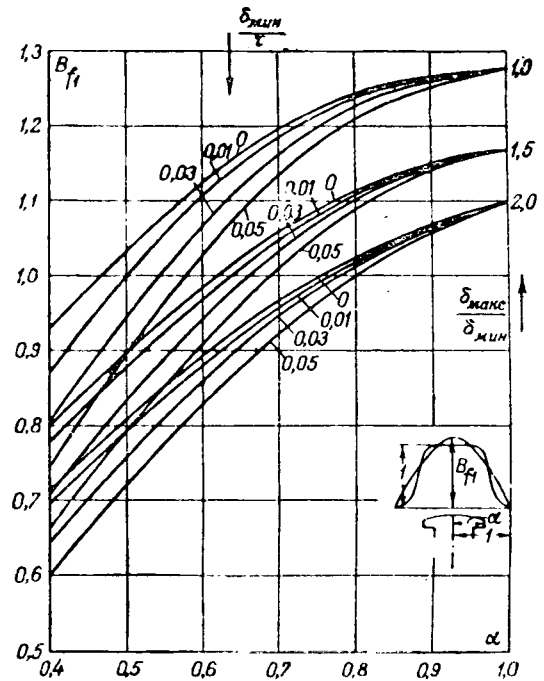


Рис. 4. Кривые для определения амплитуды основной волны потока возбуждения $B_{f1} = f(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const}$.

современные машины, а именно:

$$\alpha = 0,5 \div 0,8,$$

$$\frac{\delta_{\min}}{\tau} = 0,0 \div 0,05, \quad p = \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 1; 1,5; 2,0.$$

В ряде случаев мы сочли рациональным продолжить построение до предельного случая $\alpha = 1,0$.

На рис. 2 представлены кривые для определения амплитуды основной гармоники продольного поля якоря. Сплошные кривые получены нами, пунктирные — Виземаном. Как следует из рисунка, полученные нами кривые для $\alpha = 0,5$ значительно расходятся с кривыми Виземана, особенно в начальной их части при $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = 0$, где сделанные нами допущения меньше всего сказываются на точности результата. Для дополнительного множителя A получаются три семейства кривых, соответственно трем значениям третьей переменной, которыми мы задались, а именно: $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = 0,01; 0,03; 0,05$, а не одно семейство, как это приводит Виземан.

Семейства кривых A в большинстве случаев имеют весьма сложные закономерности, затрудняющие их графическое изображение и пользование ими. Поэтому мы сочли целесообразным отказаться от вышеуказанной схемы анализа с использованием дополнительного множителя A . Амплитуды всех гармоник представлены в виде зависимостей

$$B = f\left(\alpha, \frac{\delta_{\min}}{\tau}\right), \quad \text{при } \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 1; 1,5; 2,0.$$

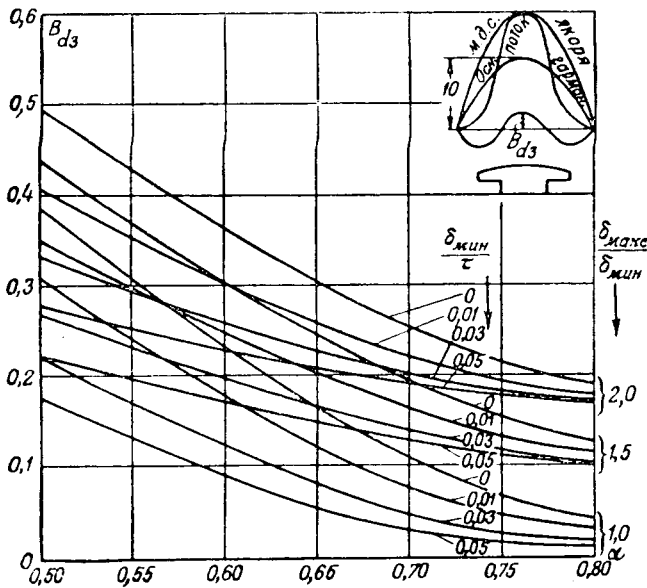


Рис. 5. Кривые для определения амплитуды третьей гармоники продольного поля якоря $B_{d3} = f(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const}$.

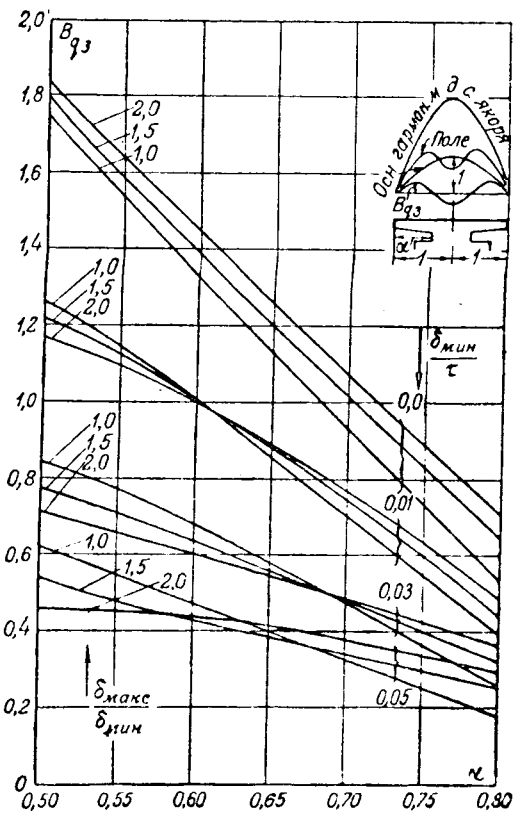


Рис. 6. Кривые для определения амплитуды третьей гармоники поперечного поля якоря $B_{q3} = f(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const}$.

дающих для искомых амплитуд гармоник полей якоря и полюсов три семейства кривых. Эти кривые для определения основной и третьей гармоник поля якоря и поля полюсов представлены на рис. 3—7.

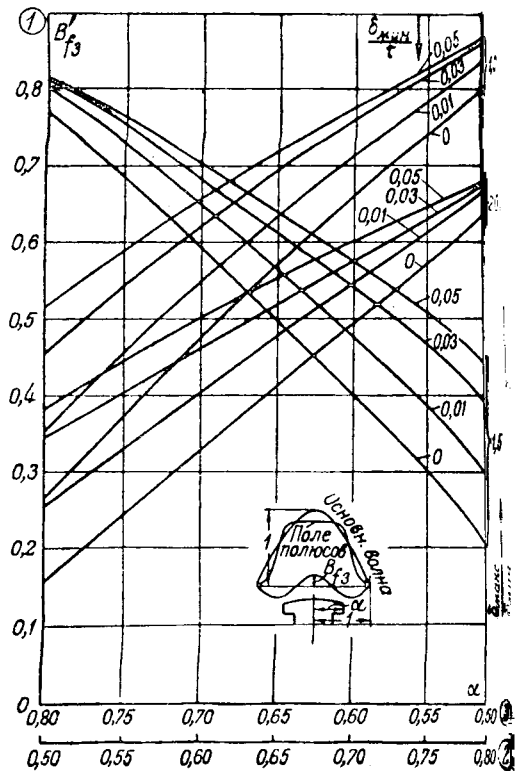


Рис. 7. Кривые для определения амплитуды третьей гармоники поля полюсов $B_{f3} = f(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const} = 1,0; 2,0$ (1—1,5 [1 = f3] [$B_{f1} = 0,6 - B_{f1}'$]).

При расчете параметров и характеристик явнополюсных синхронных машин часто приходится пользоваться коэффициентами k_d и k_q , представляющими отношения амплитуд основной волны, соответственно продольного и поперечного поля якоря, к амплитуде основной волны поля полюсов. Пользуясь кривыми рис. 8—10 представлены зависимости коэффициентов k_d и k_q в виде:

$$k_d, k_q = f\left(\alpha, \frac{\delta_{\min}}{\tau}\right),$$

при

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 1; 1,5; 2,0,$$

которые, естественно, дают также три семейства кривых. На этих рисунках пунктиром нанесены кривые для k_d и k_q , полученные на основе работ Виземана.

Выводы. 1. Кривые Виземана основаны на дополнительных допущениях, не указанных в работе.

2. В большинстве случаев результаты этой работы приводят к заметным погрешностям.

3. Все полученные нами кривые естественно и плавно подходят к теоретическим точкам, дающимся аналитическому расчету согласно выражениям (1), (2), (5), (7), (8), что не имеет места в кривых Виземана.

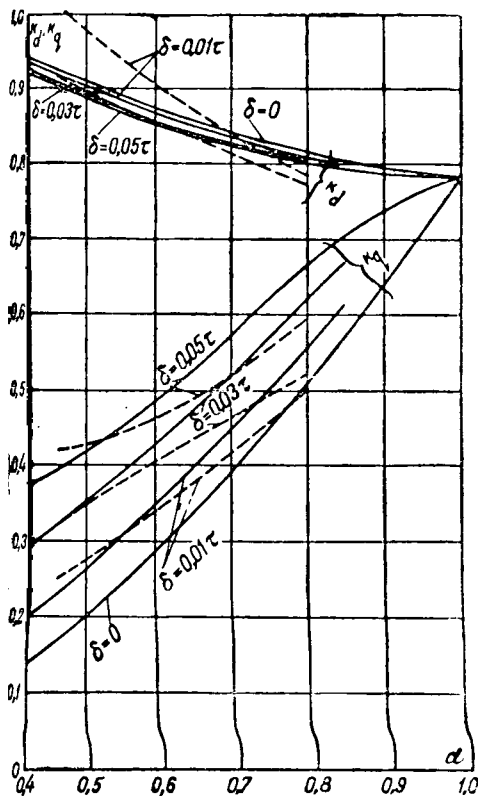


Рис. 8. Значения коэффициентов $k_d = f(\alpha)$ и $k_q = \varphi(\alpha)$ для полюсов с постоянным воздушным зазором под полюсом ($\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 1,0$).

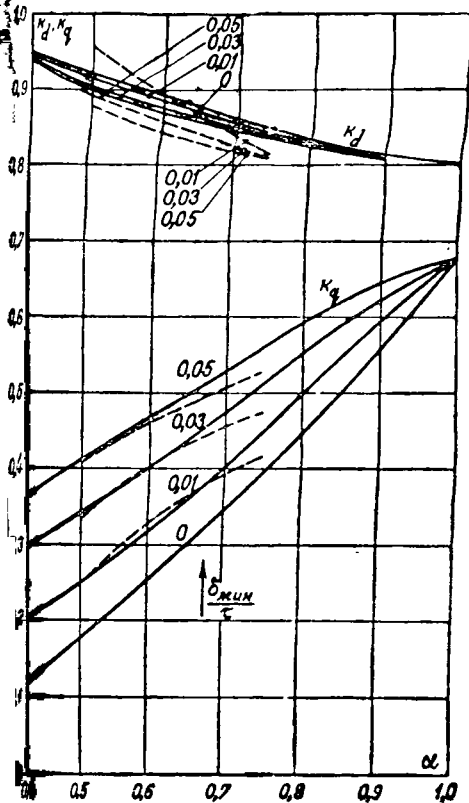


Рис. 9. Кривые коэффициентов $k_d = f(\alpha)$ и $k_q = \varphi(\alpha)$ для полюсов с постоянным воздушным зазором под полюсом ($\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 1,5$).

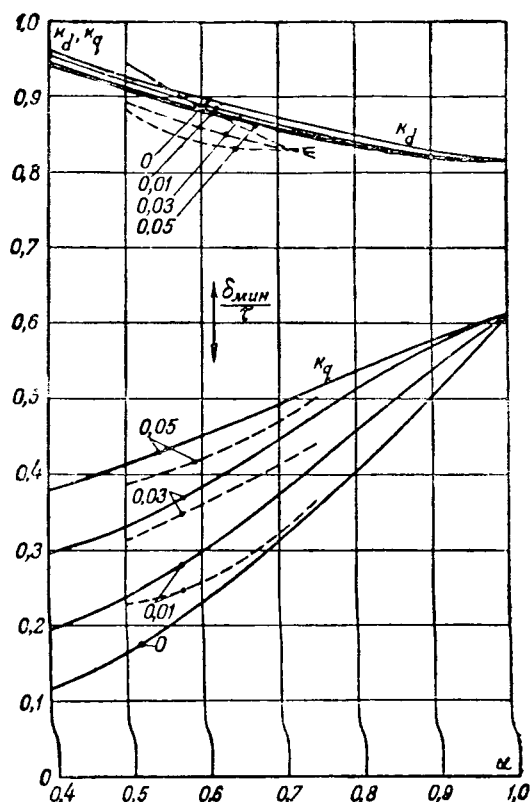


Рис. 10. Кривые коэффициентов $k_d = f(\alpha)$ и $k_q = \varphi(\alpha)$ для полюсов с постоянным воздушным зазором под полюсом ($\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 2,0$).

4. Амплитуды гармоник для некоторых частных случаев конфигураций полюсов, приводимые Рихтером [Л. 3], хорошо совпадают с полученными нами кривыми.

Авторы считают своим долгом отметить, что при выполнении ими настоящей работы они воспользовались ценными советами и указаниями доктора техн. наук, проф. Л. Р. Неймана.

Литература

1. М. П. Костенко. Электрические машины (специальная часть). Госэнергоиздат, 1949.
2. Л. Р. Нейман. Физические основы электротехники. Госэнергоиздат, 1940.
3. Р. Рихтер. Электрические машины, т. I, II.
4. П. П. Копняев. Электрические машины постоянного тока. ГИЗ Украины, стр. 323, 1926.
5. Б. Е. Коник. Определение параметров в связи с расчетом пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, представленная ЛПИ в 1946 г.
6. R. W. Wieseman. Graphical Determination of Magnetic Fields (Practical Applications to Salient Pole Synchronous Machine Design). Transact. AIEE, p. 141, 1927.
7. P. L. Alger. The Calculation of Armature Reactance of Synchronous Machines. Transact. AIEE, v. 47, 1928.
8. T. M. Linville. Starting Performance of Salient Pole Synchronous Machines. Transact. AIEE, April, 1930.
9. Th. Lehman. Peut-on remplacer une bobine inductrice par une spire équivalente par rapport à l'induit. Revue Générale de l'Electricité, p. 171—176, 6 février 1932.

[7. 8. 1950]

Уравнения переходных электромагнитных процессов асинхронного двигателя и их решение

Кандидат техн. наук А. А. ЯНКО-ТРИНИЦКИЙ

Уральский политехнический институт

1. Введение. При составлении уравнений переходного электромагнитного процесса асинхронного двигателя автор пренебрегает:

1) гистерезисом, насыщением¹ и вихревыми токами, а следовательно, и потерями в стали;

2) неравномерностью воздушного зазора между телом ротора и статора по расточке статора и неодинаковостью магнитной проводимости, обусловленной наличием пазов;

3) высшими пространственными гармониками магнитного поля, т. е. распределение магнитного поля каждой из обмоток вдоль окружности ротора и статора принято синусоидальным.

Работы, выполненные у нас в СССР и за рубежом [Л. 1, 7, 8], показали, что для большой группы практических задач подобные допущения не дают больших расхождений результатов расчета с опытом.

Ради простоты принимается, что статор и ротор имеют симметричные трехфазные обмотки. Однако это условие не имеет принципиального значения, так как предлагаемый метод легко обобщается и на многофазные обмотки. Кроме того, обмотка ротора приведена к числу витков обмотки статора, т. е. число витков обмоток статора и ротора рассматриваемой машины одинаково.

Наиболее естественно выразить уравнения асинхронного двигателя в фазных или максвелловых координатах, т. е. принять за «переменные» напряжения и токи или потокосцепления в фазных обмотках as, bs, cs, ar, br, cr , взаимное расположение которых указано на рис. 1.

Однако общеизвестно, что уравнения в этих координатах содержат ряд тригонометрических

Рассмотрена наиболее естественная, по мнению автора, методика преобразований уравнений асинхронного двигателя. Показан геометрический и физический смысл преобразований. Отмечены наиболее целесообразные формы уравнений. Дано точное решение уравнений электромагнитного переходного процесса при постоянной скорости вращения и приближенное — при переменной скорости вращения. Выведены формулы, позволяющие подсчитать все энергетические величины и составить полный энергетический баланс при переходном процессе.

коэффициентов и в малю удобны. Возникла необходимость в преобразовании уравнений при переходе к более удобной системе координат.

Наиболее удобно выбрать такую систему координат, которая давала бы возможность вместо

смотрения волны тока или намагничивающей силы (н.с.) каждой из фаз оперировать с магнитной волной тока или н.с., создаваемой в обмотках статора (или ротора). Подобная высказывалась уже более 20 лет назад [Л. 4] до сих пор не была последовательно и с физической ясностью проведена ни в одной из известных автору работ.

Некоторый шаг вперед в этом направлении представляют работы Е. Я. Казовского [Л. 5], В. А. Шубенко и И. С. Пинчука [Л. 8] и Н. А. Зоннова [Л. 2]. Автор уже предлагал на страницах журнала «Электричество» [Л. 3] для этой цели следующее преобразование мгновенных вели-

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= k(i_a + i_b + i_c), \\ i_1 &= k(i_a + a i_b + a^2 i_c), \\ i_2 &= k(i_a + a^2 i_b + a i_c), \end{aligned} \right\}$$

где k может быть равно $1/3$ или $1/\sqrt{3}$, или $2/3$. В указанной статье [Л. 3] нами принято $k = 1/3$. В настоящей статье при $k = 2/3$ по соображениям, изложенным ниже.

2. Геометрический и физический смысл нового преобразования. В преобразовании (1) величина i_0 при $k = 1/3$ совпадает с мгновенным значением составляющей нулевой последовательности, а при $k = 2/3$ будет в два раза больше. Поэтому следует подробнее остановиться лишь на пояснении геометрического смысла величин i_1 и i_2 . Рассмотрим статор асинхронной машины. Согласно условиям, сформулированным выше, каждая из обмоток создает н.с., синусоидально распределенную по зазору машины (рис. 2). Эту синусоиду удобно изобразить

¹ Насыщение может быть учтено косвенно путем использования так называемых «насыщенных» параметров, т. е. параметров, определенных при состоянии насыщения.

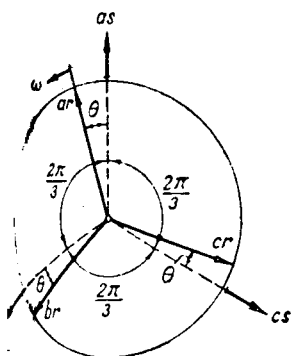


Рис. 1. Взаимное расположение осей статора (as, bs, cs) и ротора (ar, br, cr).

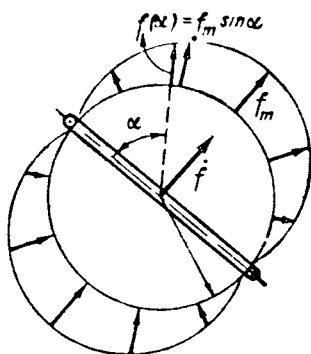


Рис. 2. Распределение магнитного поля одной обмотки по зазору и его векторное изображение.

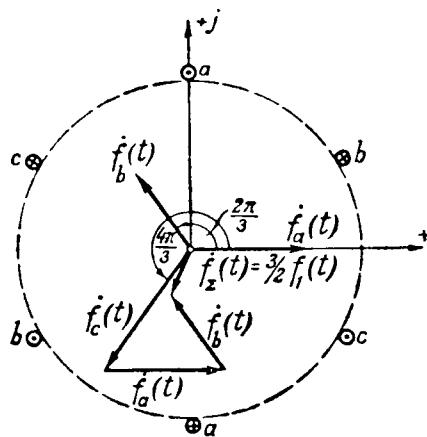


Рис. 3. Построение вектора $f_1(t)$.

направленным по оси обмотки и равным мгновенному значению н.с. в зазоре обмотки (рис. 2).

Результатирующая н.с. в зазоре, создаваемая всеми трех обмоток в любое мгновение, равна сумме н.с. отдельных обмоток, ее распределение по зазору машины также синусоидально. Известно, что сложение синусоид, сдвинутых по фазе в пространстве, можно замещением векторов, сдвинутых в пространстве (рис. 3). Таким образом, подобно тому как $f_a(t)$ изображает мгновенное значение пространственной волны н.с. фазы a , результирующий вектор $f_1(t)$ дает мгновенное значение пространственной волны результирующей н.с.

Для аналитического суммирования векторов введем две взаимно перпендикулярные оси x, y (рис. 3) и суммировать проекции векторов на эти оси. Еще целесообразнее оперировать с составляющими векторов по осям, векторами, как таковыми. Для этого достаточно совместить с плоскостью рис. 3 плоскость комплексных чисел. При этом каждый вектор выступает комплексным числом с модулем, равным длине вектора, и с аргументом, равным углу между вещественной осью и данным вектором. Это исключает возможности оперирования так: проекциями вектора на оси, которые в данном случае будут соответственно равны вещественной и мнимой частям комплексного числа, изображающего вектор.

Вектор суммарной мгновенной н.с. в комплексной форме выразится следующим образом:

$$\begin{aligned} f &= f_a + f_b + f_c = f_a e^{j0} + f_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + f_c e^{j\frac{4\pi}{3}} = \\ &= f_a + \alpha f_b + \alpha^2 f_c. \end{aligned} \quad (2,1)$$

Вектор f отличается от этой суммы лишь множителем k :

$$f_1 = k(f_a + \alpha f_b + \alpha^2 f_c). \quad (2,2)$$

Если исходить из указанных представлений пространственной волны, то наиболее естественно положить $k=1$; если следовать канонической

форме преобразований по методу симметричных составляющих, то удобнее принять $k=1/\sqrt{3}$; если исходить из инвариантности преобразования мощности [Л. 7], удобно положить $k=1/\sqrt{3}$. Однако указанные преимущества не очень существенны и наиболее целесообразно положить $k=2/3$. Положив $k=2/3$, мы получаем следующие преимущества:

1) при установившемся режиме и симметричных синусоидальных фазных напряжениях или токах i_1 (или \dot{i}_1) переходит в комплексный вращающийся вектор установившегося режима [см. (2,7)];

2) вещественная и мнимая части u_1 и i_1 представляют ортогональные составляющие u_a, u_b и i_a, i_b , применяемые рядом авторов [Л. 1];

3) проекции \dot{i}_1 (или i_1) на оси a, b, c дают в этом случае мгновенные значения фазных напряжений (или токов) при условии, что сумма фазных напряжений или токов равна нулю.

Вектор f_2 является сопряженным по отношению к f_1 :

$$f_2 = f_1^* \quad (2,3)$$

Если, посмотрев на ту же машину с другого торца, совместить вещественную ось с осью обмотки a , а мнимую повернуть на 90° от вещественной по направлению вращения векторов и произвести операции, указанные в (2,2), получим вектор f_2 . При отсутствии симметрии обмоток или магнитной симметрии приходится пользоваться обоими векторами: f_1 и $f_2 = f_1^*$. В случае же выполнения условий, указанных во введении, можно ограничиться одним из них, например f_1 .

Вместо того чтобы оперировать с н.с., можно оперировать с токами и величинами, им пропорциональными, и говорить о пространственной волне тока и соответствующих векторах. При этом

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= \frac{2}{3}(i_a + i_b + i_c), \\ i_1 &= \frac{2}{3}(i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c), \\ i_2 &= \frac{2}{3}(i_a + \alpha^2 i_b + \alpha i_c). \end{aligned} \right\} \quad (2,4)$$

Преобразование (2,4) должно быть распространено также на потокосцепления, э. д. с. и напряжения обмоток, так как вводить одинаковые преобразования всех указанных величин очень удобно.

При синусоидальном изменении фазных токов во времени можно записать:

$$\begin{aligned} i_a &= J_{am} \cos(\omega t + \alpha_a), \\ i_b &= J_{bm} \cos(\omega t + \alpha_b), \\ i_c &= J_{cm} \cos(\omega t + \alpha_c) \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} i_{am} &= J_{am} e^{j\alpha_a}, \\ i_{bm} &= J_{bm} e^{j\alpha_b}, \\ i_{cm} &= J_{cm} e^{j\alpha_c}. \end{aligned} \quad (2,5)$$

Преобразование (2,4) дает:

$$i_1 = [i_{1m} e^{j\omega t} + i_{2m} \cdot e^{-j\omega t}], \quad (2,6)$$

где i_{1m} и i_{2m} — симметричные составляющие комплексных амплитудных векторов.

При симметричной системе синусоидальных токов

$$i_1 = i_{1m} e^{j\omega t}, \quad (2,7)$$

что представляет большое удобство. При другом значении k равенство (2,7) будет содержать „паразитный“ множитель.

3. Основное преобразование уравнений асинхронного двигателя. Если записать уравнения переходного процесса асинхронного двигателя в фазных координатах и матричной форме, то мгновенные значения напряжения u , потокосцеплений ψ , энергии магнитного поля w , вращающего момента T , механической мощности p_m , скорости накопления энергии в магнитном поле Dw , электрических потерь p_e и мощности двигателя p , примут вид:

$$\begin{aligned} u &= ri + D\psi; \quad \psi = Li; \quad w = \frac{1}{2} i_i L \cdot i; \\ T &= \frac{1}{2} i_i \frac{\partial L}{\partial \theta} \cdot i; \quad p_m = \omega T = \frac{1}{2} i_i D L i; \\ Dw &= i_i \cdot L D i + \frac{1}{2} i_i D L \cdot i = \psi_i \cdot D i + p_m; \\ p_e &= i_i r i; \quad p = u_i i, \end{aligned} \quad (3,1)$$

где $D \dots = \frac{d \dots}{dt}$ — символ дифференцирования по времени (не смешивать с оператором p); θ — угол между осями as и ar (рис. 1); $\omega = D\theta$.

Значения матриц u , ψ , i , r , L даны в приложении. Переход от „старых“ (фазных) токов i к „новым“ токам i' и обратно производится по формулам

$$i = C \cdot i'; \quad i' = C^{-1} \cdot i, \quad (3,2)$$

где

$$C = [S, S]; \quad C^{-1} = [S^{-1}, S^{-1}]; \quad (3,3)$$

$$S = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

$$S^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}$$

причем:

$$S^{-1} = \frac{1}{3} S^*; \quad S_i = S; \quad S \cdot S^* = \frac{1}{3} S S^{-1} = \frac{1}{3} I$$

$$C^{-1} = \frac{1}{3} C^*; \quad C_i = C;$$

$$C \cdot C^* = \frac{1}{3} C \cdot C^{-1} = \frac{1}{3} \cdot 1.$$

Напряжения и потокосцепления преобразуют к новым координатам подобно токам.

Преобразование формул (3,1) к новым координатам по правилам матричной алгебры с тем формул (3,2) — (3,5) даст:

$$r' = C^{-1} r C = \frac{1}{3} C^* r C; \quad L' = C^{-1} L C = \frac{1}{3} C^* L C$$

$$u' = r' i' + D\psi'; \quad \psi' = L' i'; \quad w = \frac{1}{2} i_i' L' \cdot i_i'$$

$$= \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} i_i' \cdot \psi'; \quad T = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} i_i' \frac{\partial L'}{\partial \theta} \cdot i_i'; \quad p_m = \omega T$$

$$Dw = \frac{3}{4} i_i' \psi_i' D i_i' + p_m; \quad p_e = \frac{3}{4} i_i' r' i_i';$$

$$p = \frac{3}{4} u_i' i_i'.$$

Значения матриц r' , L' , $\frac{\partial L'}{\partial \theta}$ даны в приложении.

Подставляя их в (3,6), можно представить эти уравнения в развернутом виде:

$$u_{0s} = r_s i_{0s} + D\psi_{0s}; \quad u_{0r} = r_r i_{0r} + D\psi_{0r};$$

$$u_{1s} = r_s i_{1s} + D\psi_{1s}; \quad u_{1r} = r_r i_{1r} + D\psi_{1r};$$

$$u_{2s} = r_s i_{2s} + D\psi_{2s}; \quad u_{2r} = r_r i_{2r} + D\psi_{2r};$$

$$\psi_{0s} = L_{0s} \cdot i_{0s}; \quad \psi_{0r} = L_{0r} \cdot i_{0r};$$

$$\psi_{1s} = L_{1s} \cdot i_{1s} + M e^{j\theta} i_{1r};$$

$$\psi_{1r} = L_{1r} \cdot i_{1r} + M e^{-j\theta} i_{1s};$$

$$\psi_{2s} = L_{2s} \cdot i_{2s} + M e^{-j\theta} i_{2r};$$

$$\psi_{2r} = L_{2r} \cdot i_{2r} + M e^{+j\theta} i_{2s};$$

$$w = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} [i_{0s} \psi_{0s} + i_{1s} \psi_{1s} + i_{2s} \psi_{2s} + i_{0r} \psi_{0r} + i_{1r} \psi_{1r} + i_{2r} \psi_{2r}];$$

$$T = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} [i_{1s} j M \cdot e^{j\theta} i_{1r} - i_{2s} j M \cdot e^{-j\theta} i_{1r} -$$

$$- i_{1r} j M e^{-j\theta} i_{1s} + j i_{2r} M e^{+j\theta} i_{2s}]; \quad p_m = \omega T$$

$$Dw = \frac{3}{4} [\psi_{0s} \cdot D i_{0s} + \psi_{1s} D i_{1s} + \psi_{2s} D i_{2s} + \psi_{0r} \cdot D i_{0r} + \psi_{1r} \cdot D i_{1r} + \psi_{2r} \cdot D i_{2r}] + p_m; \quad (3,4)$$

$$\dot{i}_s = \frac{3}{4} [r_s (\dot{i}_{0s}^* + \dot{i}_{1s}^* + \dot{i}_{2s}^*) + r_r (\dot{i}_{0r}^* + \dot{i}_{1r}^* + \dot{i}_{2r}^*)]; \quad (3,12)$$

$$\dot{u}_s = \frac{3}{4} [\dot{u}_{0s}^* + \dot{u}_{1s}^* + \dot{u}_{2s}^* + \dot{u}_{0r}^* + \dot{u}_{1r}^* + \dot{u}_{2r}^*]; \quad (3,13)$$

Как симметрия устройства и приложенных напряжений, так и отсутствие нулевых проводящих порознь, является достаточным условием отсутствия нулевых компонент. Поэтому их можно положить равными нулю. Учитывая, что $\dot{i}_2 = \dot{i}_1^*$; $\dot{\psi}_2 = \dot{\psi}_1^*$; $\dot{u}_2 = \dot{u}_1^*$, можно отбросить последние строки в (3,7) и (3,8), как избыточные предшествующим, а остальные равенства упростить. После этого получим:

$$\dot{u}_{1s} = r_s \dot{i}_{1s} + D \dot{\psi}_{1s}; \quad \dot{u}_{1r} = r_r \dot{i}_{1r} + D \dot{\psi}_{1r}; \quad (3,14)$$

$$-L_s \dot{i}_{1s} + M e^{j\theta} \dot{i}_{1r}; \quad \dot{\psi}_{1r} = L_r \dot{i}_r + M e^{-j\theta} \dot{i}_{1s}; \quad (3,15)$$

$$\omega = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot [\dot{i}_{1s}^* \dot{\psi}_{1s} + \dot{i}_{1r}^* \dot{\psi}_{1r}]; \quad (3,16)$$

$$T = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\dot{i}_{1s}^* \cdot j M e^{j\theta} \dot{i}_{1r}]; \quad p_m = \omega T; \quad (3,17)$$

$$Dw = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\dot{\psi}_{1s}^* D \dot{i}_{1s} + \dot{\psi}_{1r}^* D \dot{i}_{1r}] + p_m = \\ = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\dot{\psi}_{1s}^* D \dot{i}_{1s} + \dot{\psi}_{1r}^* D \dot{i}_{1r} + \dot{i}_{1s}^* j \omega M e^{j\theta} \dot{i}_{1r}]; \quad (3,18)$$

$$p_s = \frac{3}{2} [r_s |\dot{i}_{1s}|^2 + r_r |\dot{i}_{1r}|^2]; \quad (3,19)$$

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\dot{u}_{1s}^* \dot{i}_{1s} + \dot{u}_{1r}^* \dot{i}_{1r}]. \quad (3,20)$$

Уравнения можно еще упростить, применив преобразование поворота.

Преобразование поворота. Вещественная ось на статоре была выбрана в § 3 совпадающей с ar (рис. 1). Таким образом, вещественные оси на статоре и на роторе сдвинуты на угол $\theta(t)$, ввиду чего в уравнениях содержатся множители $e^{\pm j\theta}$. Для устранения этого угла вращения комплексных осей статора и ротора желательно повернуть оси ротора на $(-\theta)$. Тогда оси статора и ротора будут неподвижны в пространстве. В ряде случаев удобно взаимно неподвижные системы координат статора и ротора вращать с угловым перемещением $\theta_k(t)$ и скоростью $\omega_k = D\theta_k$. Обе операции можно выразить одним математическим преобразованием:

$$\dot{i}_s = \dot{i}_{1s} e^{-j\theta_k}; \quad \dot{i}_r = \dot{i}_{1r} e^{+j\theta_k} e^{+j\theta}; \\ \dot{i}_s = \dot{i}_{1s} e^{+j\theta_k}; \quad \dot{i}_{1r} = \dot{i}_r e^{+j\theta_k} e^{-j\theta}. \quad (4,1)$$

при этом

$$D \dot{i}_{1s} = e^{j\theta_k} (D + j\omega_k) \dot{i}_s;$$

$$D \dot{i}_{1r} = e^{j(\theta_k - \theta)} (D + j\omega_k - j\omega) \dot{i}_r; \quad (4,2)$$

где

$$\omega_k = D\theta_k; \quad \omega = D\theta. \quad (4,3)$$

Аналогично преобразуются напряжения и потоко-сцепления. Подставляя (4,1) и (4,2) в (3,14)–(3,20), находим:

$$\dot{u}_s = r_s \dot{i}_s + (D + j\omega_k) \dot{\psi}_s;$$

$$\dot{u}_r = r_r \dot{i}_r + (D + j\omega_k - j\omega) \dot{\psi}_r; \quad (4,4)$$

$$\dot{\psi}_s = L_s \dot{i}_s + M \dot{i}_r; \quad \dot{\psi}_r = L_r \dot{i}_r + M \dot{i}_s; \quad (4,5)$$

$$\omega = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot [\dot{\psi}_s^* \dot{i}_s + \dot{\psi}_r^* \dot{i}_r]; \quad (4,6)$$

$$T = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\dot{i}_s^* j M \dot{i}_r] = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\dot{\psi}_s^* j \dot{i}_s]; \quad p_m = \omega T; \quad (4,7)$$

$$Dw = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\dot{\psi}_s^* D \dot{i}_s + \dot{\psi}_r^* D \dot{i}_r]; \quad (4,8)$$

$$p_s = \frac{3}{2} [r_s |\dot{i}_s|^2 + r_r |\dot{i}_r|^2]; \quad (4,9)$$

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\dot{u}_s^* \dot{i}_s + \dot{u}_r^* \dot{i}_r]. \quad (4,10)$$

Как видно, в уравнения (4,4)–(4,10) углы θ_k и θ уже не входят, а входят лишь скорости ω_k и ω . При постоянстве скоростей ω_k и ω получаются уравнения с постоянными коэффициентами, что облегчает их решение. Удобными значениями ω_k являются: $\omega_k = 0$ — координаты, неподвижные относительно статора; $\omega_k = \omega$ — координаты, неподвижные относительно ротора; $\omega_k = \omega_s$ — координаты, вращающиеся с синхронной скоростью по отношению к статору.

Интересно отметить, что в максвелловых координатах в выражение для скорости накопления энергии магнитного поля входит слагаемое, пропорциональное ω и равное механической мощности [см. формулы (3,1), (3,6), (3,11), (3,18)]. Таким образом, слагаемое, пропорциональное ω и равное механической мощности, входит дважды в выражение мгновенной мощности, забираемой из сети. Как видно из (4,8), при взаимнонеподвижных координатах на роторе и статоре слагаемые, пропорциональные ω , исчезают из выражения скорости накопления магнитной энергии.

В этом случае в выражении мощности, забираемой из сети, слагаемое, пропорциональное ω , равно механической мощности.

5. Переход к относительным единицам. Относительные единицы тока и напряжения равны соответственно амплитудным номинальным значениям фазных величин статора:

$$\dot{i}_0 = I_{s_{\max}}; \quad \dot{u}_0 = U_{s_{\max}}. \quad (5,1)$$

Относительная единица мощности равна номинальной полной мощности двигателя

$$p_o = \frac{3}{2} u_o i_o. \quad (5,2)$$

Относительная единица сопротивления

$$r_o = x_o = z_o = \frac{u_o}{i_o}. \quad (5,3)$$

За относительную единицу времени принято время, в течение которого ротор при синхронной скорости ω_s поворачивается на один электрический радиан:

$$t_o = \frac{1}{\omega_s}. \quad (5,4)$$

За единицу угловой скорости принята синхронная скорость

$$\omega_o = \omega_s. \quad (5,5)$$

За относительные единицы потокосцеплений и индуктивности приняты величины

$$\psi_o = u_o \cdot t_o = \frac{u_o}{\omega_s}; \quad L_o = \frac{\psi_o}{i_o} = \frac{u_o}{\omega_s i_o} = \frac{x_o}{\omega_s}. \quad (5,6)$$

Из уравнений (5,5) и (5,6), между прочим, следует, что при синхронной скорости индуктивность и индуктивное сопротивление выражаются в относительных единицах одним числом.

За относительную единицу энергии и вращающего момента принята величина

$$T_o = w_o = p_o t_o = \frac{3}{2} \psi_o i_o. \quad (5,7)$$

Переходя в (4,4)–(4,10) к относительным единицам, найдем:

$$u_s = r_s i_s + (D + j\omega_k) \dot{\psi}_s; \\ u_r = r_r i_r + (D + j\omega_k - j\omega) \dot{\psi}_r; \quad (5,8)$$

$$\dot{\psi}_s = x_s i_s + x_m i_r; \quad \dot{\psi}_r = x_r i_r + x_m i_s; \quad (5,9)$$

$$w = \frac{1}{2} \cdot [\dot{i}_s^* \dot{\psi}_s + \dot{i}_r^* \dot{\psi}_r]; \quad (5,10)$$

$$T = \text{Re}[\dot{i}_s^* j x_m i_r] = \text{Re}[\dot{\psi}_s^* j r_s] = x_m \text{Im}[\dot{i}_r^* i_s] = \\ = \text{Im}[\dot{\psi}_s^* i_s]; \quad p_m = \omega T; \quad (5,11)$$

$$Dw = \text{Re}[\dot{\psi}_s^* D i_s + \dot{\psi}_r^* D i_r]; \quad (5,12)$$

$$p_s = r_s |i_s|^2 + r_r |i_r|^2; \quad (5,13)$$

$$p = \text{Re}[\dot{u}_s^* i_s + \dot{u}_r^* i_r]. \quad (5,14)$$

Легко проверить, что для всех приведенных групп формул справедливо равенство:

$$p = p_s + p_m + Dw. \quad (5,15)$$

Ради полноты и проверки баланса мощности (5,15) выше найдены все энергетические величины. В ряде задач можно ограничиться определением момента, воспользовавшись формулами (5,8), (5,9), (5,11).

6. Иные формы основных уравнений. В мулах, приведенных выше, фигурируют как так и потокосцепления. Можно исключить потокосцепления с помощью (5,9), либо с помощью зависимости, обратной (5,9), а именно:

$$i_s = \frac{1}{x_s} \dot{\psi}_s - \frac{1}{x_m} \dot{\psi}_r;$$

$$i_r = -\frac{1}{x_m} \dot{\psi}_s + \frac{1}{x_r} \dot{\psi}_r.$$

После исключения потокосцеплений основные зависимости примут вид:

$$\dot{u}_s = [r_s + x_s(D + j\omega_k)] \dot{\psi}_s + x_m(D + j\omega_k) \dot{\psi}_r;$$

$$\dot{u}_r = x_m(D + j\omega_k - j\omega) \dot{\psi}_s + [r_r + x_r(D + j\omega_k - j\omega)] \dot{\psi}_r;$$

$$T = \text{Re}[\dot{i}_s^* j x_m i_r] = x_m \text{Im}[\dot{i}_r^* i_s].$$

При исключении токов основные уравнения примут вид:

$$\dot{u}_s = \left[\frac{r_s}{x_s} + (D + j\omega_k) \right] \dot{\psi}_s - \frac{r_s}{x_m} \dot{\psi}_r;$$

$$\dot{u}_r = -\frac{r_r}{x_m} \dot{\psi}_s + \left[\frac{r_r}{x_r} + (D + j\omega_k - j\omega) \right] \dot{\psi}_r;$$

$$T = \frac{1}{x_m} \text{Re}[-j \dot{\psi}_s^* \dot{\psi}_r] = \frac{1}{x_m} \text{Im}[\dot{\psi}_s^* \dot{\psi}_r].$$

Ниже показано, что эти уравнения все же полезны при решении задач без учета активного сопротивления статора, так как непосредственно интегрируются в квадратурах (см. § 8). Разделив вещественные и мнимые части в (5,8), (5,11), легко найти уравнения:

$$u_{as} = r_s i_{as} + D \psi_{as} - \omega_k \psi_{\beta s};$$

$$u_{\beta s} = r_s i_{\beta s} + D \psi_{\beta s} + \omega_k \psi_{as};$$

$$u_{ar} = r_r i_{ar} + D \psi_{ar} - (\omega_k - \omega) \psi_{\beta r};$$

$$u_{\beta r} = r_r i_{\beta r} + D \psi_{\beta r} + (\omega_k - \omega) \psi_{ar}; \quad (6,1)$$

$$\psi_{as} = x_s i_{as} + x_m i_{ar};$$

$$\psi_{\beta s} = x_s i_{\beta s} + x_m i_{\beta r}; \quad (6,2)$$

$$\psi_{ar} = x_m i_{as} + x_r i_{ar};$$

$$\psi_{\beta r} = x_m i_{\beta s} + x_r i_{\beta r}; \quad (6,3)$$

$$T = \psi_{as} i_{\beta s} - \psi_{\beta s} i_{as}; \quad (6,4)$$

которые при $\omega_k = \omega$ переходят в уравнения Стенли [Л. 5].

7. Решение при постоянной скорости вращения ($\omega = \text{const}$). Перейдя в (6,2) к операторной форме, легко получить:

$$Z_{ss} I_s + Z_{sr} I_r = \check{U}_s,$$

$$Z_{rs} I_s + Z_{rr} I_r = \check{U}_r, \quad (7,1)$$

$$Z_{ss} = r_s + x_s(p + j\omega_k); \quad Z_{sr} = x_m(p + j\omega_k);$$

$$Z_{rs} = x_m(p + j\omega_k - j\omega); \quad Z_{rr} = r_r +$$

$$+ x_r(p + j\omega_k - j\omega); \quad (7,2)$$

$$\dot{U}_s = U_s + \psi_s(0)p; \quad \dot{U}_r = U_r + \psi_r(0)p;$$

$$U_s = u_s e^{-j\omega_k t}; \quad U_r = u_r e^{-j\omega_k t} \cdot e^{+j\omega t}.$$

Уравнения легко решаются в явном виде относительно операторных токов:

$$I_s = \frac{1}{\sigma x_s H(p)} \left[(a_r + p + j\omega_k - j\omega) \dot{U}_s - \right.$$

$$\left. - k_r(p + j\omega_k) \dot{U}_r \right];$$

$$I_r = \frac{1}{\sigma x_r H(p)} \cdot \left[-k_s(p + j\omega_k - j\omega) \dot{U}_s + \right.$$

$$\left. + (a_s + p + j\omega_k) \dot{U}_r \right], \quad (7,3)$$

$$H(p) = p^2 + [j(2\omega_k - \omega) + a'_r + a'_s]p +$$

$$+ [a'_r a'_s - \omega_k(\omega_k - \omega) + j(\omega_k - \omega)a'_s + j\omega_k a'_r]. \quad (7,4)$$

Корни многочлена $H(p)$ равны:

$$p_{1,2} = \frac{1}{2} \left\{ -[a'_r + a'_s + j(2\omega_k - \omega)] \pm \right.$$

$$\left. \pm \sqrt{(a'_r - a'_s - j\omega)^2 + 4a'_r a'_s k} \right\}. \quad (7,5)$$

В частном случае при $\omega_k = \omega$; $\psi_s(0) = 0$; $\psi_r(0) = 0$ уравнения (6,4), (6,5) совпадают с уравнениями Казовского [Л. 1].

При любых начальных условиях и при любых напряжениях, состоящих из постоянных, синусоидальных и даже экспоненциальных составляющих, операторные токи легко раскрываются по теоремам разложения и находятся $i_s(t)$ и $i_r(t)$ а затем и вращающий момент по формуле (7,3).

При необходимости определения всех энергетических величин, достаточно пользоваться формулами (5,9), (5,10), (5,12), (5,14).

В случае включения симметричной системы трехфазных напряжений во вращающийся двигатель, в котором отсутствуют токи и обмотка замкнута, достаточно положить $\omega_k = \omega$; $\psi_s(0) = \psi_r(0) = 0$, после чего получится операторное решение, рассмотренное автором в [Л. 3, 4] (формула (11)).

Раскрывая операторные токи по теореме разложения, легко найти:

$$i_s = \frac{\dot{U}}{\sigma x_s} \left[\frac{a_r + js}{p_1 p_2} + \frac{a_r + p_1 + js}{p_1(p_1 - p_2)} e^{p_1 t} - \right.$$

$$\left. - \frac{a_r + p_2 + js}{p_2(p_1 - p_2)} e^{p_2 t} \right]; \quad (7,6)$$

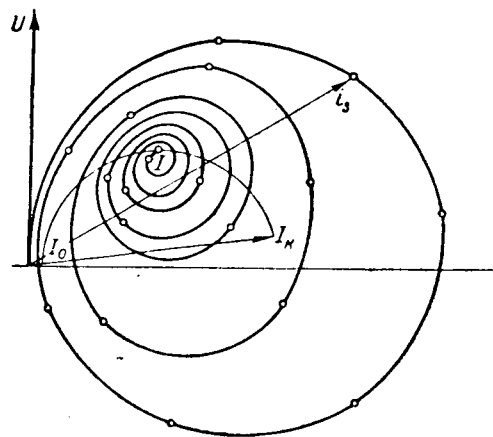


Рис. 4. Спираль, описываемая вектором i_s при включении $U = U_{omk}$ и постоянном скольжении $S = 0,068$.

$$i_r = \frac{\dot{U}(-k_s)}{\sigma x_s} \left[\frac{js}{p_1 p_2} + \frac{p_1 + js}{p_1(p_1 - p_2)} e^{p_1 t} - \right.$$

$$\left. - \frac{p_2 + js}{p_2(p_1 - p_2)} e^{p_2 t} \right]. \quad (7,7)$$

Кстати, из (7,7) легко усмотреть, что начальная фаза включаемого напряжения не отражается на величине вращающего момента T , так как

$$\dot{U} \cdot \dot{U}^* = U^2. \quad (7,8)$$

Интересно отметить, что комплексные токи $i_s(t)$ и $i_r(t)$ при $t \rightarrow \infty$ переходят в комплексные токи установившегося режима. Например, конец вектора $i_s(t)$, описав спираль, приходит в точку круговой диаграммы² установившегося режима, соответствующую данной скорости вращения ω (рис. 4). Автором произведен также анализ скорости затухания переходного электромагнитного процесса и зависимости его от скорости вращения двигателя, но ограниченный объем статьи не дает возможности изложить этот анализ.

8. Расчет электромагнитного переходного процесса при заданном изменении скорости вращения во времени без учета активного сопротивления статора. При $r_s = 0$ и $\omega_k = 0$ уравнения (6,4) принимают вид:

$$\dot{u}_s = D \dot{\psi}_s; \quad (8,1)$$

$$\dot{u}_r = -a'_m \dot{\psi}_s + [a'_r + (D - j\omega)] \dot{\psi}_r. \quad (8,2)$$

Эта система всегда интегрируется в квадратурах. Действительно, из (8,1) следует, что

$$\dot{\psi}_s(t) = \dot{\psi}_s(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{u}_s dt, \quad (8,3)$$

² Числовые подсчеты произведены В. А. Бажановой.

т. е. $\dot{\psi}_s(t)$ в уравнении (8,2) можно рассматривать как известную функцию, после чего уравнение (8,2) также интегрируется в квадратурах. Для этого уравнению (8,2) удобно придать вид:

$$\frac{d\dot{\psi}_r}{dt} = (j\omega - a'_r)\dot{\psi}_r + (a'_m\dot{\psi}_s + \dot{u}_r) = a(t)\dot{\psi}_r + b(t). \quad (8,4)$$

Из (8,4) сразу же следует, что

$$\dot{\psi}_r(t) = \dot{\psi}_r(t_0) \cdot e^{\int_{t_0}^t a(\zeta) d\zeta} + \int_{t_0}^t b(\eta) \cdot e^{\int_{t_0}^{\eta} a(\zeta) d\zeta} d\eta, \quad (8,5)$$

например [Л. 6]. Таким образом, задача о переходном электромагнитном процессе при заданной скорости вращения всегда решается.

Частный случай этого решения, а именно, когда скорость изменяется по линейному закону, рассмотрен в [Л. 1], где показано другим путем, что (8,5) приводится к гауссовому интегралу ошибок или родственным ему функциям—интегралам Френеля.

Следует, однако, отметить, что при наличии коммутации в статоре пренебрежение активным сопротивлением статора дает небольшие погрешности лишь в начальные моменты переходного процесса. При переходных же процессах, не связанных с коммутацией в статоре, получаются удовлетворительные решения на всем протяжении переходного процесса.

Кроме того, при отсутствии коммутации в статоре и $r_s = 0$ получается еще одно упрощение:

$$\dot{\psi}_s = \frac{1}{j\omega_s} \dot{u}_s = \frac{1}{j} \dot{u}_s. \quad (8,6)$$

Подставляя это в формулу (5,11), легко найти:

$$T = \operatorname{Re} [\dot{\psi}_s j \dot{i}_s^*] = \frac{1}{\omega_s} \operatorname{Re} [\dot{u}_s \dot{i}_s^*] = \frac{p}{\omega_s} = p. \quad (8,7)$$

Таким образом, известная зависимость установившегося режима распространяется на указанные случаи переходных процессов. Это положение любезно сообщил автору В. А. Шубенко.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Значения некоторых матриц, не приведенных в тексте

1) Матрица напряжения, входящая в (3,1), имеет вид:

$$u = \begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix}, \text{ где } u_s = \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix}, u_r = \begin{bmatrix} u_{ar} \\ u_{br} \\ u_{cr} \end{bmatrix}. \quad (\text{п.1})$$

Аналогично выражаются матрицы тока и потокоцеплений.

2) Матрица активного сопротивления, входящая в (3,1):

$$r = [r_s, r_r], \text{ где } r_s = r_s \cdot 1 \text{ и } r_r = r_r \cdot 1. \quad (\text{п.2})$$

3) Матрица индуктивности, входящая в (3,1):

$$L = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix},$$

где

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}, \quad L_{rr} = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$L_{sr} = (L_{rs})^t = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 120^\circ) & \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \cos \theta & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

4) Матрицы, входящие в (3,6):

$$r' = [r_s 1, r_s 1].$$

$$L' = \begin{bmatrix} L'_{ss} & L'_{sr} \\ L'_{rs} & L'_{rr} \end{bmatrix}.$$

$$L'_{ss} = \begin{bmatrix} L_{os} & & \\ & L_s & \\ & & L_s \end{bmatrix}$$

$$L'_{rr} = \begin{bmatrix} L_{or} & & \\ & L_r & \\ & & L_r \end{bmatrix}$$

$$L'_{sr} = M \begin{bmatrix} & & \\ & e^{j\theta} & \\ & & e^{-j\theta} \end{bmatrix}$$

$$L'_{rs} = (L'_{sr})^t.$$

$$\frac{\partial L'}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} & \frac{\partial L'_{sr}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L'_{rs}}{\partial \theta} & \end{bmatrix}; \quad \frac{\partial L'_{sr}}{\partial \theta} = jM \begin{bmatrix} & & \\ & e^{j\theta} & \\ & & -e^{-j\theta} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial L'_{rs}}{\partial \theta} = \left(\frac{\partial L'_{sr}}{\partial \theta} \right)^t.$$

значения, принятые в работе, но недостаточно поясненные в тексте:

i, L, r — матрицы напряжения, потокосцеплений, тока, индуктивности, сопротивления и т. д.;

1 — единичная матрица;

s, r — индексы статора и ротора;

ω_s, ω_r — угловые частоты установившихся токов статора и ротора.

ω — угловая скорость вращения машины;

$l_s(l_r)$ — индуктивность одной фазы статора (ротора);

$m_s(m_r)$ — взаимная индуктивность двух фаз статора (ротора);

m — наибольшая индуктивность между одной фазой ротора и статора;

$L_{or} = l_r + 2m_r$ — индуктивность нулевой последовательности статора (ротора);

$L_{sr} = l_s - m_s$ ($L_{lr} = L_{rr} = L_r = l_r - m_r$) — индуктивность прямой последовательности статора (ротора);

$\frac{3}{2}m$ — трехфазный коэффициент взаимной индукции

статора и ротора;

$\frac{L_{rr} - M^2}{L_s L_r}$; $\tau = \frac{L_s L_r - M^2}{M^2}$ — коэффициенты рас-

пределения по Блонделю и Гейланду;

$$k = \frac{M^2}{L_s L_r}; \quad k_s = \frac{M}{L_s}; \quad k_r = \frac{M}{L_r};$$

$$\alpha_s = \frac{r_s}{L_s}; \quad \alpha_r = \frac{r_r}{L_r}; \quad \alpha_m = \frac{r_r}{M};$$

$$\alpha'_s = \frac{\alpha_s}{\sigma}; \quad \alpha'_r = \frac{\alpha_r}{\sigma}; \quad \alpha'_m = \frac{\alpha_m}{\tau}.$$

Мгновенные значения обозначены малыми буквами, а их операторные изображения — большими печатными, так, например:

$$i = i(t) \doteq I(p) = I;$$

Re, Im — вещественная, мнимая часть;

индекс t обозначает транспонирование;

$*$ обозначает сопряженную величину.

Литература

1. Е. Я. Казовский. Переходные режимы в асинхронных машинах при включениях и коротких замыканиях. Электричество, стр. 19—27, № 6, 1947.

2. Н. А. Сазонов. Переходные явления при пуске короткозамкнутых электродвигателей. Электричество, № 12, 1949.

3. А. А. Янко-Триницкий. К статье Е. Я. Казовского „Переходные режимы в асинхронных машинах при включениях и коротких замыканиях“, Электричество, № 10, 1948. Дискуссии.

4. Р. Рюденберг. Явления неустановившегося режима в электрических установках. ГНТИ, 1931.

5. H. C. Stanley. An Analysis of the Induction Machine. Tr. of AIEE, v. 57, p. 751—755, 1938.

6. И. Г. Петровский. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. ОГИЗ, Гостехиздат, 1947.

7. G. Kron. The Application of Tensors to the Analysis of Rotating Electrical Machinery. GEC, 1942.

8. В. А. Шубенко и И. С. Пинчук. Графический метод расчета электромеханических переходных процессов в асинхронных двигателях. Электричество, № 2, 1950.

[26. 5. 1950]



Длинные линии с изменяющимися по длине параметрами

Доктор техн. наук В. Ю. ЛОМОНОСОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В одноименной работе В. А. Ильина (Электричество, № 2, 1950) указан интересный прием для расчета неоднородных линий, питающихся от источника синусоидального напряжения. Пусть генератор находится в точке $x=l$, а нагрузка в точке $x=0$. Если рассечь линию в произвольной точке, то входное сопротивление приемного участка линии Z_{sx} будет функцией переменной x , и для него В. А. Ильин получил уравнение

$$\frac{dZ_{sx}}{dx} + Y_0 Z_{sx}^2 - Z_0 = 0, \quad (1)$$

где Z_0 и Y_0 — сопротивление и проводимость единицы длины линии.

Коль скоро найден интеграл уравнения (1), решение исходной системы

$$\frac{d\dot{U}}{dx} = Z_0 \dot{I}; \quad \frac{d\dot{I}}{dx} = Y_0 \dot{U} \quad (2)$$

сводится к несложной задаче интегрирования одного из следующих двух уравнений:

$$\frac{d\dot{I}}{dx} - Y_0 Z_{sx} \dot{I} = 0; \quad \frac{d\dot{U}}{dx} - \frac{Z_0}{Z_{sx}} \dot{U} = 0. \quad (3)$$

Но в том-то и дело, что уравнение (1) решается лишь в редких случаях.

Заслуживает внимания попытка заменить систему дифференциальных уравнений (2) равносильной ей системой интегральных уравнений

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_2 + \int_0^x Z_0(\xi) \dot{I}(\xi) d\xi, \quad (4)$$

$$\dot{I}(x) = \dot{I}_2 + \int_0^x Y_0(\xi) \dot{U}(\xi) d\xi, \quad (5)$$

где \dot{U}_2 и \dot{I}_2 — напряжение и ток на приемном конце линии — предполагаются известными.

Общий прием решения такой системы состоит в следующем. Задаемся приближительным распределением напряжения (или тока) по

Предлагается дифференциальные уравнения длинной линии с переменными параметрами заменить эквивалентной системой интегральных уравнений, которая может быть решена при помощи метода последовательных приближений. В ряде случаев такой прием интегрирования может быть полезен при решении рассматриваемой задачи.

длине линии, т. е. выберем более или менее произвольный вид зависимости $\dot{U}(x)$. Подставим выражение $\dot{U}(\xi)$ в правую часть уравнения (5) и численно соответствующим

интеграл, мы получим приближительное распределение тока вдоль линии. Найденное выражение подставим в правую часть уравнения (4) после чего, проделав требуемые вычисления, получаем следующее приближение для искомого $\dot{U}(x)$. Эта функция вновь подставляется в (5) и т. д.

В теории интегральных уравнений доказывается, что этот процесс сходится к искомым функциям $\dot{U}(x)$ и $\dot{I}(x)$. При решении практических задач важно обеспечить быструю сходимость процесса, а она определяется в основном, насколько удачно выбрано первое приближение. Универсального рецепта здесь не существует, но некоторые типичные режимы все же могут быть указаны.

Если неоднородность линии выражена слабо, т. е. изменения функций $Z_0(x)$ и $Y_0(x)$ в промежутке $l \geq x \geq 0$ невелики, то в качестве первого приближения целесообразно взять известные формулы

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \nu x + \dot{I}_2 Z_c \operatorname{sh} \nu x,$$

$$\dot{I}(x) = \dot{I}_2 \operatorname{ch} \nu x + \dot{U}_2 Y_c \operatorname{sh} \nu x, \quad (6)$$

понимая под

$$\nu = \sqrt{Z_0 Y_0}, \quad Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}, \quad Y_c = \sqrt{\frac{Y_0}{Z_0}}$$

их средние значения, т. е.

$$\nu = \frac{1}{l} \int_0^l \sqrt{Z_0(x) Y_0(x)} dx$$

и т. д.

При постоянном волновом сопротивлении

$$\frac{Z_0(x)}{Y_0(x)} = Z_c^2 = \text{постоянной}, \quad (7)$$

тема (2) может быть проинтегрирована, именно:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}(x) &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \varphi + i_2 Z_c \operatorname{sh} \varphi, \\ \dot{I}(x) &= i_2 \operatorname{ch} \varphi + \dot{U}_2 Y_c \operatorname{sh} \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{1}{Z_c} \int_0^x Z_0(\xi) d\xi. \quad (9)$$

тому при малых изменениях волнового сопротивления по длине линии целесообразно взять формулы (8) в качестве первого приближения. Заслуживает внимания и тот случай, когда

$$Z_0 = ae^{-2ax}; \quad Y_0 = be^{2ax}. \quad (10)$$

При этом решением системы (2) будет:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}(x) &= e^{-ax} \left[\dot{U}_2 \operatorname{ch} vx + \frac{a\dot{I}_2 + a\dot{U}_2}{v} \operatorname{sh} vx \right], \\ \dot{I}(x) &= e^{ax} \left[i_2 \operatorname{ch} vx + \frac{b\dot{U}_2 - ai_2}{v} \operatorname{sh} vx \right]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

обозначено $v^2 = a^2 + ab$.

Покажем применение указанного способа на примере. Пусть $Z_0 = j300(1+2x)$, $Y_0 = j0,1e^{-1,1x}$, $l=1$, $\dot{U}_2=100$, $i_2=1$,

тогда все численные значения даны в произвольных единицах. Отметим, что степень неоднородности этой линии достаточно высока, так что отношение

$$\frac{|Z_0|_{\max}}{|Z_0|_{\min}} = 3, \quad \frac{|Y_0|_{\max}}{|Y_0|_{\min}} \approx 3,$$

то время как в однородной линии они равны единице.

Итак, сопротивление линии возрастает по ее длине, а проводимость уменьшается. Сходную закономерность дают формулы (10), если считать коэффициент a отрицательным. Положив в этих формулах $a = -0,55$, $b = j0,1$, мы получим точное выражение для проводимости и приближенное

$$ae^{1,1x} \approx j300(1+2x)$$

сопротивления. Распорядимся постоянной a таким образом, чтобы квадратичная погрешность первого приближения

$$\Delta = \int_0^1 [ae^{1,1x} - j300(1+2x)]^2 dx \quad (12)$$

была наименьшей. Дифференцируя выражение (12) по a и приравнявая результат нулю, находим:

$$a = j300 \cdot 1,0888 = j326,63.$$

В степени полученного приближения дает погрешность табл. 1.

Таблица 1

| x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $1,0888 e^{1,1x}$ | 1,089 | 1,356 | 1,691 | 2,106 | 2,625 | 3,270 |
| $1+2x$ | 1,000 | 1,400 | 1,800 | 2,200 | 2,600 | 3,000 |

Подставляя численные значения во вторую из формул (11), получаем первое приближение для функции напряжения

$$\dot{U}_I(x) = e^{0,55x} [100 \cos 5,69x + (j57,5 - 9,7x) \sin 5,69x].$$

Подставлять этот результат в правую часть формулы (5) нет надобности, так как функция $Y_0(x)$ в нашей задаче та же, что и в формуле (10), и, следовательно, указанная подстановка даст нам вторую из формул (11), т. е.

$$\dot{I}_I(x) = e^{-0,55x} [\cos 5,69x + (j1,758 + 0,097) \sin 5,69x].$$

Подстановка только что найденного значения в формулу (4) дает второе приближение для напряжения

$$\begin{aligned} U_{II}(x) &= 2,0 - j7,6 + e^{-0,55x} \{ (-22,8 + j57,0 + \\ &+ 17,8x + j103,5x) \cdot \sin 5,69x + (98,0 + j7,6 + \\ &+ 183,7x - j20,2x) \cos 5,69x \}. \end{aligned}$$

Сопоставим численные значения, полученные из первого и второго приближений.

Таблица 2

| x | $\dot{U}_I(x)$ | | $\dot{U}_{II}(x)$ | |
|-----|----------------|----------|-------------------|----------|
| | модуль | аргумент | модуль | аргумент |
| 0 | 100 | 0 | 100 | 0 |
| 0,1 | 90 | 21°20' | 89,5 | 20°25' |
| 0,2 | 69 | 57°35' | 68 | 57° |
| 0,3 | 72,5 | 112°10' | 73 | 114°40' |
| 0,4 | 105 | 148°40' | 110 | 151°20' |
| 0,5 | 131 | 170°20' | 140 | 172°30' |
| 0,6 | 132 | 169°22' | 143 | 191°07' |
| 0,7 | 108 | 215°50' | 118 | 216°20' |
| 0,8 | 89 | 263°30' | 97 | 259°25' |
| 0,9 | 118 | 312°40' | 117 | 306°30' |
| 1,0 | 163 | 340° | 153 | 334°40' |

Из табл. 2 видно, что расхождение между результатами обоих приближений не превосходит 9% по модулю и 6° по углу. Отсюда следует, что уже первое приближение правильно наметило ход зависимости $\dot{U}(x)$. Но тогда можно утверждать, что разница между истинными значениями искомой функции и вторым приближением меньше разницы между вторым и первым приближениями. Таким образом, второе приближение дало практически достаточную точность в линии, длина которой примерно равна длине волны.

Расчет переходных процессов в сложных линиях с распределенными и сосредоточенными постоянными

Инженер И. Л. САПИР

Свердлов

Простая линия с распределенными постоянными по всей своей длине характеризуется постоянными значениями активного сопротивления r , индуктивности L , емкости C и проводимости g , приходящимися на единицу длины. Сложная линия состоит из нескольких простых линий, соединенных последовательно или параллельно. В число элементов сложной линии могут входить также цепи с сосредоточенными постоянными. Сечения, в которых имеет место разветвление линии, смыкание участков с различными постоянными или включение сосредоточенных постоянных будем называть особыми сечениями. Расчет переходных процессов в сложных линиях весьма усложняется явлениями частичного отражения волн тока и напряжения во всех особых граничных сечениях.

Ниже излагается порядок численного расчета переходного процесса в сложной системе, основанный на методе характеристик¹. Этот метод заключается в том, что решение заданной системы уравнений в частных производных заменяется решением системы обыкновенных дифференциальных уравнений, так называемых характеристических уравнений. Замена возможна, если заданная система относится к гиперболическому типу, т. е. имеет два семейства вещественных и различных характеристик. Применение метода характеристик позволяет достаточно просто рассчитать переходные процессы в любой практически возможной сложной системе.

Как показано в приложении, уравнения длинных линий можно привести к следующим двум

Изложено применение метода, развитого и обоснованного С. А. Христиановичем, к расчету переходных процессов в длинных линиях. Метод основан на замене уравнений в частных производных гиперболического типа эквивалентной им системой обыкновенных дифференциальных уравнений, так называемых характеристических уравнений. Метод позволяет произвести эффективный численный расчет переходного процесса в сложных линиях, состоящих из ряда различных участков, при нелинейных граничных условиях и наличии включенных в линию сосредоточенных постоянных.

системам обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = a,$$

$$dU = -zdl - \beta l ds,$$

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{1}{\sqrt{LC}} = -a,$$

$$dU = zdl - \beta l ds;$$

здесь s — координата, отсчитанная по длине линии;

t — время;

$z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ — волновое сопротивление линии;

$a = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ — скорость распространения волн,
 $\beta = r \left(1 - \frac{gL}{Cr}\right)$.

Первые уравнения систем (1) и (2) определяют скорость распространения фронта волны. Интегрируя их, получим траектории распространения волн, называемые характеристиками:

$$s - s_w = a(t - t_w), \quad (1)$$

$$s - s_z = -a(t - t_z). \quad (2)$$

Индексами W и Z обозначены некоторые произвольные начальные точки ($s = s_w, t = t_w$ и $s = s_z, t = t_z$). Вдоль характеристик семейства (1"), соответствующих распространению волн в положительном направлении s (эти характеристики будем называть положительными), выполняется уравнение

$$U - U_w = -z(I - I_w) - \beta \int_{s_w}^s l ds. \quad (3)$$

¹ Метод был широко развит и обоснован С. А. Христиановичем [Л. 1] и плодотворно применен в работах Н. Т. Мелешенко [Л. 2] и М. А. Мосткова [Л. 3].

Соответственно вдоль характеристик (2''), которые будем называть отрицательными, выполняется уравнение

$$U - U_2 = z(I - I_2) - \beta \int_{s_2}^s Ids. \quad (4)$$

В случае³ линии без искажения $\beta = 0$,

$$\left. \begin{aligned} s - at &= \text{const}, \\ U + zI &= \text{const}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} s + at &= \text{const}, \\ U - zI &= \text{const}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В общем случае $\beta \neq 0$ получим приближенное решение. Обозначив через I усредненное значение тока (в смысле теоремы о среднем значении) на участке характеристики $s - s_{w(2)}$,

имеем:

$$Id s = \bar{I}(s - s_{w(2)}) \approx \frac{I_{w(2)} + I}{2} (s - s_{w(2)}). \quad (7)$$

С учетом (7) уравнения (3) и (4) приведем к виду:

$$U + (z + p_w)I = R_w, \quad (8)$$

$$U - (z + p_2)I = Q_2. \quad (9)$$

Здесь введены обозначения³

$$\left. \begin{aligned} R_w &= U_w + (z - p_w)I_w, \\ Q_2 &= U_2 - (z - p_2)I_2, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} p_w &= \frac{1}{2} \beta (s - s_w), \\ p_2 &= \frac{1}{2} \beta (s_2 - s). \end{aligned} \right\} \quad (10')$$

Величины p , имеющие размерность сопротивления, можно трактовать как некоторые „активные сопротивления на характеристиках“. Уравнения (8) и (9) отличаются от (5), (6) тем, что к ним, наряду с волновым сопротивлением z , добавлено активное сопротивление p . Для линии без искажения имеем $p = 0$ и уравнения (8), (9) переходят в (5), (6).

Общая схема расчета методом характеристик. Рассмотрим пример сложной линии (рис. 1, а). Пусть линия I является граничным сечением, линия II — сечением смыкания участков A и B, характеризуемых, соответственно, постоянными z_A, p_A, β_A и z_B, p_B, β_B и сечение III — вторым граничным сечением. Введем в рассмотрение плоскости s, t (рис. 1, б). Совокупность координат

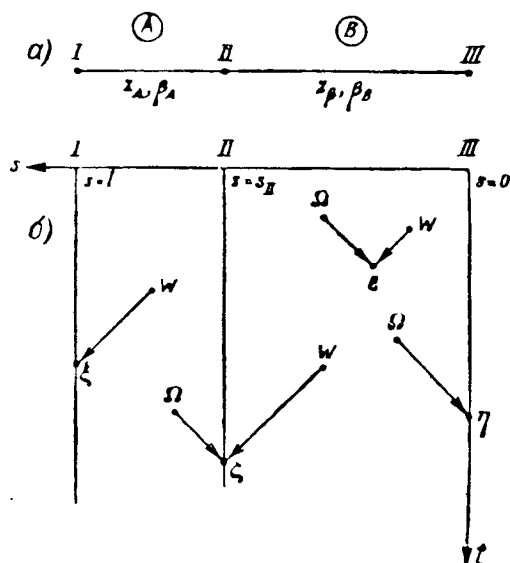


Рис. 1

s, t (сечение с координатой s в момент времени t) будем называть точкой (точка на плоскости s, t). Целью расчета переходного процесса является определение значений U и I во всех интересующих нас точках.

Рассчитываемые точки могут быть четырех типов: а) внутренняя точка ϵ ; б) точка на особом сечении ζ ; в) точка, лежащая „на нижнем“, по направлению s , граничном сечении ζ ; г) точка, лежащая на „верхнем“ граничном сечении η . Укажем расчетные уравнения для каждого типа этих точек.

Внутренняя точка ϵ определяется двумя исходными точками W, Ω , из которых выходят соответственно положительная и отрицательная характеристики, пересекающиеся в точке ϵ . Вдоль положительной характеристики выполняется уравнение (8), вдоль отрицательной — уравнение (9). Точка ϵ , лежащая на пересечении характеристик, очевидно, должна удовлетворять обоим уравнениям. Решая их совместно, найдем:

$$U = \frac{R_w(z + p_2) + Q_2(z + p_w)}{2z + p_w + p_2}, \quad (11)$$

$$I = \frac{R_w - Q_2}{2z + p_w + p_2}. \quad (12)$$

Здесь z и p — параметры данного участка линии, величины же R и Q определяются по формулам (10) соответственно для точек W и Ω .

Условия протекания тока через особое сечение определяются уравнениями, связывающими значения U и I по обе стороны данного сечения. Например, для сечения смыкания двух участков линии (сечение II, рис. 1, а) имеем:

$$\left. \begin{aligned} I_{II, A} &= I_{II, B} = I_{II}, \\ U_{II, A} &= U_{II, B} = U_{II}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

³ Системы (5) и (6) можно непосредственно получить из интеграла Д'Аламбера (для линии без искажения).

⁴ Заметим для отрицательной характеристики

$-a$ и $s < s_2$.

Если бы в этом сечении имелось сосредоточенное активное сопротивление r_{II} , то вместо (13) мы имели бы:

$$\left. \begin{aligned} I_{II, A} &= I_{II, B} = I_{II}, \\ U_{II, A} &= U_{II, B} - I_{II} \cdot r_{II}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Для краткости не останавливаемся на других практически встречающихся особых сечениях. Для каждого из них имеется своя система уравнений, аналогичная системам (13) и (14).

Для сечения смыкания двух различных участков линии A и B , из уравнений (8) и (9) и системы уравнений (13) получим:

$$U = \frac{R_W(z_A + \rho_Q) + Q_Q(z_B + \rho_W)}{z_A + z_B + \rho_Q + \rho_W}, \quad (15)$$

$$I = \frac{R_W - Q_Q}{z_A + z_B + \rho_W + \rho_Q}. \quad (16)$$

Если участки A и B имеют одни и те же параметры: $z_A = z_B$ и $\beta_A = \beta_B$, то уравнения (15) и (16) переходят в уравнения (11) и (12).

Граничная точка ξ определяется заданным граничным условием и характеристическим уравнением (8). Если в общем случае граничное условие записать в виде $\Phi_\xi(U, I) = 0$, то расчет точки ξ будет заключаться в решении системы

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\xi(U, I) &= 0, \\ U + (z + \rho_W)I &= R_W. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Аналогично, для второй граничной точки η , лежащей на пересечении граничного сечения и отрицательной характеристики, имеем:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\eta(U, I) &= 0, \\ U - (z + \rho_Q)I &= Q_Q. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Таким образом, возможные точки рассчитываются при помощи: а) системы двух характеристических уравнений — внутренняя точка; б) системы двух характеристических уравнений и уравнений, определяющих данное особое сечение — точка на особом сечении; в) системы уравнений, образованных из граничного условия, и одного из характеристических уравнений — точка на граничных сечениях.

Из формул (10) можно получить следующие полезные при расчетах зависимости:

$$\left. \begin{aligned} R &= Q_{ucx} + 2zI, \\ Q &= R_{ucx} - 2zI. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Здесь Q_{ucx} и R_{ucx} — значения Q и R в исходных точках, которые выше были обозначены индексами Q и W . Порядок использования этих зависимостей мы поясним ниже.

Порядок расчета. Предположим, что требуется рассчитать сложную линию, состоящую из K различных участков. Каждый участок обозначим буквами A, B, C, \dots . Сечения, в кото-

рых соединяются различные участки — и дополнительные расчетные сечения — назовем римскими цифрами I, II, III, \dots . Если имеются ответвления, то система нумерации та же, но для каждого ответвления добавляется соответствующий индекс, например, A_1, B_1, \dots . Каждый участок линии характеризуется постоянными z_n, ρ_n и временем пробега волны по данному

участку (полуфазе): $\mu_n = \frac{t_n}{a_n}$. Расчет значений

μ и I производится для всех особых, дополнительных и граничных сечений через определенные расчетные промежутки времени. Отметим весьма важное обстоятельство: расчетный промежуток времени не может быть выбран произвольно. За расчетный промежуток времени должен быть принят какой-либо наибольший общий делитель всех полуфаз $\mu_A, \mu_B, \dots, \mu_K$.

Пусть, например, линия состоит из трех участков A, B и C . При этом $\mu_B = 1,41 \mu_A$; $\mu_C = 2,18 \mu_A$. С некоторым округлением считаем $\mu_B = 1,40 \mu_A$ и $\mu_C = 2,20 \mu_A$. Следовательно, в данном случае за расчетный промежуток времени следует принять $T_p = 0,2 \mu_A$, так как 0,2 — наибольший делитель величин 1; 1,40; 2,20. Для расчета удобно ввести относительное время $\tau = \frac{t}{T_p}$, иначе говоря, производить изменение времени в выбранных расчетных единицах времени T_p . Тогда для полуфаз будем иметь

$\nu_n = \frac{\mu_n}{T_p}$. В рассмотренном примере $\nu_A = 5$, $\nu_B = 11$. Заметим, что при указанном выборе расчетного промежутка времени T_p значения ν для всех участков будут целыми числами.

Параллельно расчету для большей наглядности удобно вычерчивать план характеристики в виде плоскости S, τ (рис. 2), где нанесены створы I, II , и т. д., указаны участки A, B и выписаны значения постоянных z_n, ρ_n и μ_n каждого из участков. На схеме наносятся дополнительные линии, соответствующие моментам $\tau = 0, 1, 2, \dots$. Далее, на подготовленной таким образом схеме наносим линию, соответствующую распространению первой волны. Если волна возникла в створе I , то через $\tau = \nu_A$ она дойдет

⁴ Если обозначить через l_n длину n -го участка и ввести характеристику через весь участок, то согласно (10), активное сопротивление на характеристиках будет

$$\rho_n = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{g_n l_n}{l_n r_n} \right) r_n l_n. \text{ В тех случаях, когда } r \text{ с}$$

нимом по величине z (напомним, что для линии без потерь $\rho = 0$), для увеличения точности расчета данного участка линии следует разбить на ряд более мелких участков. Вводимые, таким образом, расчетные сечения будем называть дополнительными сечениями. Расчет в этих сечениях производится по уравнениям (11) и (12).

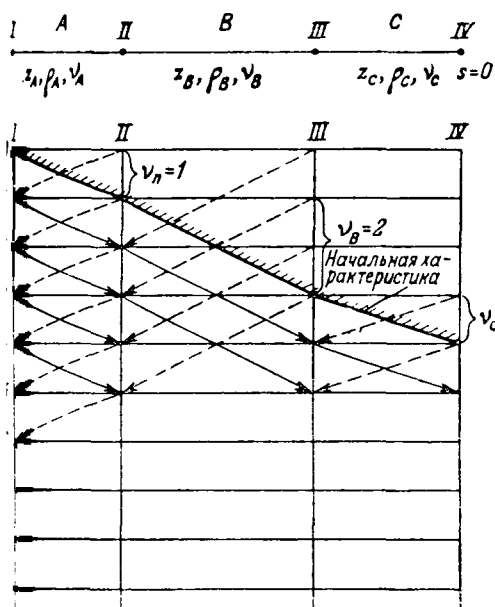


Рис. 2.

II, еще через $\tau = \nu_B$ — до створа III
ведем следующую запись: $U_{N,\tau}$ и $I_{N,\tau}$. Это
п, что данная величина U или I относится
сечению в момент τ . Совокупность индек-
 N, τ будем называть точкой. Например,
III, 5 указывает на III створ в момент
для всех точек (N, τ) , лежащих выше прове-
линии распространения первой волны,
не производится, так как в них еще не на-
начальный заданный режим.
еще были получены зависимости, которые
дем виде можно записать так:

$$\left. \begin{aligned} U_{N,\tau} &= f_1(R_{N+1, \tau-\nu_{np}}; Q_{N-1, \tau-\nu_A}), \\ I_{N,\tau} &= f_2(R_{N+1, \tau-\nu_{np}}; Q_{N-1, \tau-\nu_A}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

смы при R и Q указывают на соответст-
ие исходные точки (рис. 3). Конкретное
ление зависимостей f_1 и f_2 определяется
данной точки (см. выше).

рски рассчитываются последовательно, идя
горизонталям от сечения I к сечениям II, III
д. Ход расчета поясним применительно
2. Предположим, что при начальном ре-
и $i=0$. Для сечения I граничное
е, например, задано в виде $u=mt$, где
const. Переходя к τ и U , для этого сечения
иметь:

$$U = m_1 \tau e^{a_1 \tau},$$

$$m_1 = m T_p$$

$$a_1 = \frac{g_A}{r_A} T_p$$

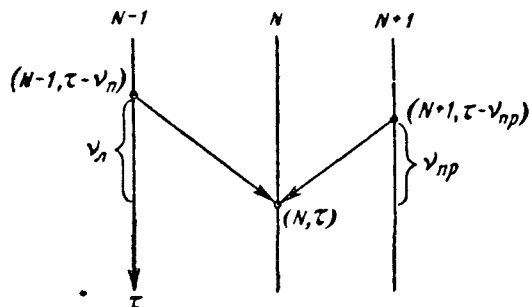


Рис. 3.

Для сечения IV предположим граничное
условие в виде $i=0$, а следовательно, $I=0$.
Сечения II и III являются сечениями смыкания
различных участков линии.

Для расчета данной линии выпишем необхо-
димые расчетные зависимости типа (1). Для то-
чек, относящихся к сечению I, имеем согласно
(17) и заданному граничному условию

$$\left. \begin{aligned} U &= m_1 \tau e^{a_1 \tau}, \\ I &= \frac{R_{II, \tau-1} - U}{z_A + \rho_A}. \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

Для сечений II согласно (15) и (16) имеем:

$$\left. \begin{aligned} U &= K_1 R_{III, \tau-2} + K_2 Q_{I, \tau-1}, \\ I &= K_3 (R_{III, \tau-2} - Q_{I, \tau-1}). \end{aligned} \right\} \quad (b)$$

Здесь

$$\begin{aligned} K_1 &= (z_A + \rho_A) K_3; \quad K_2 = (z_B + \rho_B) K_3; \\ K_3 &= \frac{1}{z_A + z_B + \rho_A + \rho_B}. \end{aligned}$$

Для сечения III аналогично

$$\left. \begin{aligned} U &= K_4 R_{IV, \tau-1} + K_5 Q_{II, \tau-2}, \\ I &= K_6 (R_{IV, \tau-1} - Q_{II, \tau-2}), \end{aligned} \right\} \quad (в)$$

Здесь

$$\begin{aligned} K_4 &= (z_B + \rho_B) K_6; \quad K_5 = (z_C + \rho_C) K_6; \\ K_6 &= \frac{1}{z_B + z_C + \rho_B + \rho_C}. \end{aligned}$$

Для граничного сечения IV согласно (18)
и заданному граничному условию имеем:

$$\left. \begin{aligned} U &= Q_{III, \tau-1}, \\ I &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (г)$$

Далее проводим, как указано было выше,
начальную характеристику (линию распростра-
нения первой волны). Для записи результатов
расчета составляем таблицу, показанную на
рис. 4. Расчет начинаем с точки I, 1. Из урав-
нений (a), учитывая, что $R_{II,0}=0$, имеем:

$$U_{I,1} = m e^{a_1} \quad \text{и} \quad I_{I,1} = -\frac{m_1 e^{a_1}}{z_A + \rho_A}.$$

Вписываем численные величины $U_{I,1}$ и $I_{I,1}$ в таб-
лицу. Для точек, лежащих на линии I, величины
 R не вычисляются. Из этих точек может исхо-

| Время τ | | Сечение | | | |
|--------------|---|---------|----|-----|----|
| | | I | II | III | IV |
| 0 | U | | | | |
| | I | | | | |
| | Q | | | | |
| | R | | | | |
| 1 | U | | | | |
| | I | | | | |
| | Q | | | | |
| | R | | | | |
| 2 | U | | | | |
| | I | | | | |
| | Q | | | | |
| | R | | | | |
| 3 | U | | | | |
| | I | | | | |
| | Q | | | | |
| | R | | | | |

Рис. 4.

дить только отрицательные характеристики, которым соответствуют величины Q . Поэтому значение $R_{I,I}$ прочеркивается, величина же Q применительно к сечению I определяется согласно (19):

$$Q_{I,\tau} = R_{II,\tau-1} - 2z_A I_{I,\tau}. \quad (д)$$

Для точки I, I имеем:

$$Q_{I,I} = R_{II,0} - 2z_A I_{I,I} = -2z_A I_{I,I}.$$

Величина $I_{I,I}$ определена выше. На этом расчет точки I, I заканчивается. Совершенно аналогично рассчитываем точку $I, 2$. Для этой точки исходной будет точка II, I . Рассчитываем точку $II, 2$. Для этой точки исходными будут точки I, I и $III, 0$. Значения $I_{II,2}$ и $U_{II,2}$ определяем из уравнений (6), значения R и Q — из уравнений (19). Затем рассчитываем точку $I, 3$ (исходная точка — $II, 2$), затем $II, 3$ (исходные точки: $I, 2$ и III, I). Следующая на этой же горизонтали точка $III, 3$ не рассчитывается, так как она лежит в области начального режима. Переходим к горизонтали $\tau=4$. Для точки $I, 4$ исходной будет точка $II, 3$, для точки $II, 4$ исходными будут точки $I, 3$ и $III, 2$. Далее идет точка $III, 4$, для которой исходными будут точки $II, 2$ и $IV, 3$. Точка $IV, 4$ относится к начальному режиму.

Расчет точек, лежащих на горизонтали $\tau=5$, и всех последующих, совершенно аналогичен изложенному. Таким образом, последовательно рассчитываются значения U и I во всех расчетных сечениях в течение интересующего нас периода времени.

В заключение отметим, что расчет переходного процесса в любой другой сложной линии производится по этой же схеме. Из изложенного видно, что метод характеристик дает возможность произвести численный расчет переходного процесса в любой сложной линии. Сложность линии и граничных условий при пользовании изложенным методом практически не затрудняют расчета.

Приложение. Выпишем известные уравнения линий:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial s} &= rI + L \frac{\partial I}{\partial t}, \\ -\frac{\partial I}{\partial s} &= gU + C \frac{\partial U}{\partial t}; \end{aligned} \right\}$$

здесь I — ток;

u — напряжение;

s — координата, отсчитанная по длине линии

t — время.

Введем, как обычно при расчете длинных новых функции

$$u = e^{\alpha t} U; \quad I = e^{\alpha t} I.$$

Относительно функций U и I при $\alpha = -\frac{g}{r}$!

ния (А) запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial U}{\partial s} &= \beta I + L \frac{\partial I}{\partial t}, \\ -\frac{\partial I}{\partial s} &= C \frac{\partial U}{\partial t}; \end{aligned} \right\}$$

здесь

$$\beta = r \left(1 - \frac{gL}{cr} \right).$$

С учетом тождественных соотношений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t} &= \frac{dI}{dt} - \frac{\partial I}{\partial s} \frac{ds}{dt}, \\ \frac{\partial U}{\partial t} &= \frac{dU}{dt} - \frac{\partial U}{\partial s} \frac{ds}{dt}. \end{aligned} \right\}$$

Уравнения (С) приведем к виду:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial U}{\partial s} + L \frac{\partial I}{\partial s} \frac{ds}{dt} &= \beta I + L \frac{dI}{dt}, \\ C \frac{\partial U}{\partial s} \frac{ds}{dt} - \frac{\partial I}{\partial s} &= C \frac{dU}{dt}. \end{aligned} \right\}$$

Выпишем характеристические определители:

$$D_0 = \begin{vmatrix} -1 & L \frac{ds}{dt} \\ C \frac{ds}{dt} & -1 \end{vmatrix} = 1 - LC \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 = 0,$$

$$D = \begin{vmatrix} \beta I + L \frac{dI}{dt} & L \frac{ds}{dt} \\ C \frac{dU}{dt} & -1 \end{vmatrix} = -\beta I - L \frac{dI}{dt} -$$

$$-LC \left(\frac{ds}{dt} \right) \frac{dU}{dt} = 0.$$

Из (I) и (K) определяются уравнения характеристик (1) и (2).

Литература

1. С. А. Христианович, С. Г. Михлин, Б. Б. Девисон. Некоторые новые вопросы механики сплошной среды. АН СССР, 1938.
2. Н. Т. Мелешенко. Общий метод расчета правлищеского удара, Известия НИИГ, т. 29, 1940.
3. М. А. Мостков. Основы теории гидроэнергетического проектирования, Госэнергоиздат, 1948.

Юрия работы многофазных несамоуправляемых инверторов с конденсаторной коммутацией

Кандидат техн. наук И. И. КАНТЕР

Москва

Вращение в области
инвертирования высоко-
мощных ртутных выпря-
мителей расширили воз-
можность решения про-
блемы выбора системы
для электрической

превращения ртутного
преобразователя на электро-

дает возможность не только использовать его
в качестве выпрямителя, но и для обратного пре-
вращения — инвертирования постоянного тока
в переменный. Инвертор работает изолированно
от питающей сети переменного тока, и все
нужные мощности покрываются за счет кон-
денсаторов или же для покрытия реактивной
мощности используются синхронные машины.

Вращение инверторов с конденсаторной или
индуктивной коммутацией позволяет осуществить
превращение постоянного тока высокого напряжения
(например, 20 кВ) в контактной сети с двигате-
лем переменного тока на электровозе. Если же
использовать переменные напряжения выпря-
мления, то можно создать систему постоянного тока
с высоким напряжением в контактной сети с дви-
гателем постоянного тока на электровозе. Здесь
рассмотрены полностью статические пре-
вращатели с конденсаторной коммутацией.

В настоящей статье кратко рассмотрены неко-
торые вопросы теории многофазных инверторов,
предложенной автором.

Инвертирование постоянного тока в трехфа-
зную схему «звезда-звезда». Кратко работа
инвертора происходит следующим обра-
зом. Если открыть, например, вентиль 1 (рис. 1),
то ток плюса источника пройдет через фазу I
вторичной обмотки трансформатора, вентиль 1
и через катодный дроссель L_d к минусу
источника. Возникающие при этом э.д.с., обу-
словленные индуктивностью фаз, I, II, III, заря-
жают конденсаторы до такого значения, что по
прошествии $1/3$ периода, когда открывается вен-
тиль 2, конденсаторы, разряжаясь, гасят вен-
тиль 1. Перезарядившись, они получают напря-
жение такой полярности, что при открытии по ис-

Предлагаются формулы для определения напряже-
ния инвертора при активно-индуктивной нагрузке
и различных схемах. Даются выражения для опре-
деления времени, предоставляемого для деиониза-
ции вентилей. Выводятся расчетные формулы для
типовой мощности конденсаторов. Устанавливается
функциональная зависимость типовой мощности
трансформатора от параметров схемы. Выводятся
уравнения, определяющие внешнюю характеристику
инвертора.

течении $2/3$ периода вен-
тиля 3 они, разряжаясь,
гасят вентиль 2 и т. д.

При таком процессе во
вторичной обмотке возни-
кает трехфазное напряже-
ние.

Образование инвертор-
ного напряжения при
активно-индуктивной на-

грузке. В реальной схеме конденсаторы подклю-
чены так, как это показано на рис. 1. Но кон-
денсаторы также можно подключить и на вторич-
ной стороне трансформатора, соединив их звез-
дой или в треугольник. Однако подключение кон-
денсаторов на первичной стороне имеет то досто-
инство, что их разрядные контуры не включают
в себя реактивностей (например, реактивность
рассеяния трансформатора) и, следовательно,
коммутация вентилей происходит практически
мгновенно.

Для цели математического исследования
преобразуем схему так, чтобы конденсаторы
были подключены на вторичной стороне транс-
форматора (рис. 2). В действительной схеме
конденсаторы на первичной стороне соединены
в треугольник, а на вторичной стороне мы соеди-
няем их в звезду. Для сохранения действитель-
ных соотношений при расчете следует поэтому
исходить из формы преобразования треугольника
в звезду. Принимая коэффициент трансформации
равным единице, имеем:

$$x_1 = \frac{x_a}{3},$$

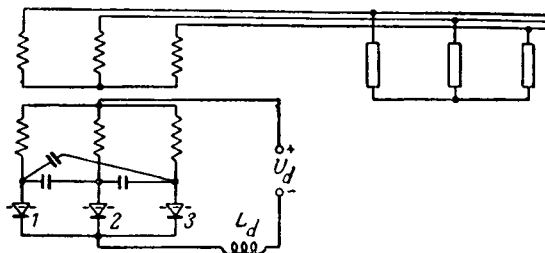


Рис. 1. Принципиальная схема трехфазного инвертора, соединенного по схеме звезда-звезда.

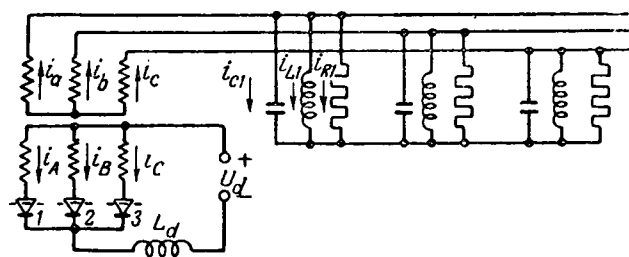


Рис. 2. Расчетная схема трехфазного инвертора, соединенного по схеме звезда-звезда.

где x_a — емкостное сопротивление фазы при соединении треугольником;

x_1 — то же, при соединении звездой.

Сделаем следующие допущения: 1) индуктивность катодного дросселя равна бесконечности, омическим сопротивлением его пренебрегаем; 2) коммутация вентилей происходит мгновенно; 3) потерями и рассеянием трансформатора пренебрегаем.

Первое допущение означает, что волнистость постоянного тока равна нулю. Второе допущение означает, что мы пренебрегаем изменением напряжения во время коммутации. Как первое, так и второе допущения вполне возможны, если учесть, что рассматривается трехфазный инвертор и что коммутация вентилей, как показывает опыт, происходит в течение доли микросекунды. Что касается тока холостого хода, то он может быть учтен при окончательном определении емкости конденсаторов.

Рассмотрим теперь, какие напряжения возникают во всех трех фазах инвертора, когда, например, проводящим является вентиль I.

Время работы вентиля I составляет $\frac{T}{3} = t_0$. За начало отсчета времени примем среднюю точку между двумя коммутациями. Таким образом, время t изменяется в пределах от $-\frac{t_0}{2}$ до $+\frac{t_0}{2}$.

Токораспределение во вторичной обмотке трансформатора найдем из следующих соображений. Для нулевой точки должно быть справедливо

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (1)$$

Далее, для идеального трансформатора сумма н. с. по любому замкнутому контуру должна быть равна нулю.

Поэтому для контура, проходящего через стержни I и II,

$$i_A - i_a - i_b - i_B = 0. \quad (2)$$

Для контура, проходящего через стержни II и III,

$$i_B - i_b + i_c - i_C = 0, \quad (3)$$

где i_A, i_B, i_C и i_a, i_b, i_c — первичные и вторичные токи в фазах I, II, III. Решая совместно уравнения (1), (2), (3) и положив, что $i_A = I_d$,

$i_B = 0; i_C = 0$, имеем:

$$i_a = \frac{2}{3} I_d, \quad i_b = -\frac{1}{3} I_d, \quad i_c = -\frac{1}{3} I_d.$$

У каждой фазы потребителя токи i_a, i_b, i_c соответственно распределяются, причем так, должно быть:

$$i_{R1} + i_{L1} + i_{C1} = \frac{2}{3} I_d;$$

$$i_{R2} + i_{L2} + i_{C2} = -\frac{1}{3} I_d;$$

$$i_{R3} + i_{L3} + i_{C3} = -\frac{1}{3} I_d;$$

здесь i_{R1}, i_{R2}, i_{R3} — соответственно токи в омическом сопротивлении фаз;
 i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} — в индуктивностях фаз;
 i_{C1}, i_{C2}, i_{C3} — в емкостях фаз I, II, III.

Из (5) получаем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{d^2 u_1}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{du_1}{dt} + \frac{1}{LC} u_1 = 0,$$

$$\frac{d^2 u_2}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{du_2}{dt} + \frac{1}{LC} u_2 = 0,$$

$$\frac{d^2 u_3}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{du_3}{dt} + \frac{1}{LC} u_3 = 0.$$

Для определения шести постоянных интегрирования мы располагаем следующими шестью граничными условиями:

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0,$$

$$i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} = 0,$$

$$|u_3|_{t=-\frac{t_0}{2}} = |u_1|_{t=-\frac{t_0}{2}},$$

$$|u_1|_{t=-\frac{t_0}{2}} = |u_2|_{t=-\frac{t_0}{2}},$$

$$|i_{L3}|_{t=-\frac{t_0}{2}} = |i_{L1}|_{t=-\frac{t_0}{2}},$$

$$|i_{L1}|_{t=-\frac{t_0}{2}} = |i_{L2}|_{t=-\frac{t_0}{2}}.$$

Как можно доказать, граничные условиятекают из двух положений. Сумма вторичных токов трансформатора равна нулю, и для нажений и токов должен существовать сдвиг фазе. Определив постоянные интегрирования и подставив в общее решение уравнений получим:

$$u_1 = \frac{I_d}{C(k_2 - k_1)} \times \left\{ -\frac{e^{-\frac{k_1 t_0}{2}} + e^{\frac{k_1 t_0}{2}}}{e^{k_1 t_0} + e^{-k_1 t_0} + 1} e^{k_1 t} + \frac{e^{-\frac{k_2 t_0}{2}} + e^{\frac{k_2 t_0}{2}}}{e^{k_2 t_0} + e^{-k_2 t_0} + 1} e^{k_2 t} \right\}$$

$$u_2 = \frac{I_d}{C(k_2 - k_1)} \times$$

$$\left\{ \frac{e^{\frac{k_1 t_0}{2}}}{e^{k_1 t_0} + e^{-k_1 t_0} + 1} e^{k_1 t} - \frac{e^{\frac{k_2 t_0}{2}}}{e^{k_2 t_0} + e^{-k_2 t_0} + 1} e^{k_2 t} \right\}$$

$$u_3 = \frac{I_d}{C(k_2 - k_1)} \times \left\{ \frac{e^{-\frac{k_1 t_0}{2}}}{e^{k_1 t_0} + e^{-k_1 t_0} + 1} e^{k_1 t} - \frac{e^{-\frac{k_2 t_0}{2}}}{e^{k_2 t_0} + e^{-k_2 t_0} + 1} e^{k_2 t} \right\},$$

k_1 и k_2 определяются из характеристического уравнения

$$k^2 + \frac{1}{RC}k + \frac{1}{LC} = 0.$$

Корни характеристического уравнения k_1 и k_2 могут быть действительными, сопряженными комплексными или равными. В первом случае напряжение между двумя коммутациями изменяется в одной фазе аperiodически, во втором случае — в месте колебания. В третьем случае мы находим границу аperiodической области изменения напряжений. Обозначим:

$$k_{1,2} = -a \pm d, \quad k_{1,2} = -a \pm jb. \quad (9)$$

Соответственно решению характеристического уравнения имеем:

$$a = \frac{1}{2CR}, \quad c' = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad d = \sqrt{a^2 - (c')^2},$$

$$b = \sqrt{(c')^2 - a^2}. \quad (10)$$

Теперь как мы установим связь между I_d и параметрами нагрузки, исходя из того, что

$$U_d = \frac{1}{t_0} \int_{-\frac{t_0}{2}}^{\frac{t_0}{2}} u_1 dt, \quad (11)$$

придем к конечным выражениям для инверторного напряжения. Так, для случая, когда k_1 и k_2 — сопряженные комплексы, имеем:

$$u_1 = U_d \frac{(c't_0)^2}{2} e^{-at} \times \left\{ \frac{\sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right) \cos bt_0 + 2e^{\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t - \frac{t_0}{2} \right) \cos bt_0 + e^{\frac{3}{2}at_0} \sin b \left(-t - \frac{t_0}{2} \right) + e^{-\frac{3}{2}at_0} \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right)}{at_0 \sin 2bt_0 + at_0 \sin bt_0 \operatorname{ch} at_0 - bt_0 \cos bt_0 \operatorname{sh} at_0 - bt_0 \operatorname{sh} 2at_0} \right\},$$

$$u_2 = U_d \frac{(c't_0)^2}{2} e^{-at} \left\{ \frac{-e^{-\frac{3}{2}at_0} \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right) - e^{\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t - \frac{3}{2}t_0 \right) - e^{-\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t - \frac{t_0}{2} \right)}{at_0 \sin 2bt_0 + at_0 \sin bt_0 \operatorname{ch} at_0 - bt_0 \cos bt_0 \operatorname{sh} at_0 - bt_0 \operatorname{sh} 2at_0} \right\}, \quad (12)$$

$$u_3 = U_d \frac{(c't_0)^2}{2} e^{-at} \left\{ \frac{-e^{\frac{3}{2}at_0} \sin b \left(-t - \frac{t_0}{2} \right) - e^{\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right) - e^{-\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t + \frac{3}{2}t_0 \right)}{at_0 \sin 2bt_0 + at_0 \sin bt_0 \operatorname{ch} at_0 - bt_0 \cos bt_0 \operatorname{sh} at_0 - bt_0 \operatorname{sh} 2at_0} \right\};$$

$$-\frac{t_0}{2} \leq t \leq \frac{t_0}{2}.$$

Приводя доказательства, укажем, что полученные формулы для напряжений всех трех фаз, вычисленные для трети периода t_0 , дают, однако, одинаковые значения напряжения любой фазы за весь период $T = 3t_0$.

Введем понятие о коэффициенте загрузки

$$B = \frac{1}{zC} \quad (13)$$

где z — кажущееся сопротивление фазы нагрузочной цепи.

Введение коэффициента загрузки B сводит количество параметров, от которых зависит инверторное напряжение, к двум: B и $\cos \varphi$ нагрузки. Установим связь между величинами a , c' , b , d и коэффициентом загрузки B и $\cos \varphi$.

В колебательной области c' является собственной частотой колебаний при отсутствии затухания; a — коэффициент затухания собственных колебаний; b — фактическая собственная частота колебаний. Величину d для общности формул примем за фиктивную частоту колебаний (d имеет размерность частоты). Принимая во внимание (10) и (13), получаем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{a}{2\pi f} &= \frac{3at_0}{2\pi} = \frac{1}{2} \cos \varphi B, \\ \frac{c'}{2\pi f} &= \frac{3}{2} \frac{c't_0}{\pi} = \sqrt{B \sin \varphi}, \\ \frac{b}{2\pi f} &= \frac{3}{2} \frac{bt_0}{\pi} = \sqrt{B \sin \varphi - \frac{1}{4} \cos^2 \varphi B^2}, \\ \frac{d}{2\pi f} &= \frac{3}{2} \frac{dt_0}{\pi} = \sqrt{\frac{1}{4} \cos^2 \varphi B^2 - B \sin \varphi}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Для иллюстрации на рис. 3а даны рассчитанные по формулам (12) кривые 1 и 2 инверторного напряжения фазы I за весь период. Кривая 1 дана для активно-индуктивной нагрузки, когда корни k_1 и k_2 — сопряженные комплексы. Кривая 2 — для случая активной нагрузки.

На рис. 3б даны соответствующие осциллограммы 1, 2.

Анализ кривых показывает, что инверторные напряжения в рассматриваемой схеме имеют большой процент высших гармонических. Поряд-

док гармонических таков, что он соответствует порядку высших гармонических в кривой вторичного фазного тока трансформатора [уравнение (4)].

Указанное обстоятельство дает основания для следующих суждений.

Для того чтобы получить кривую инверторного напряжения, возможно близкую к синусоиде и по форме менее зависимую от параметров нагрузки, следует выбрать такую схему, которая бы обеспечила кривую вторичного фазного тока

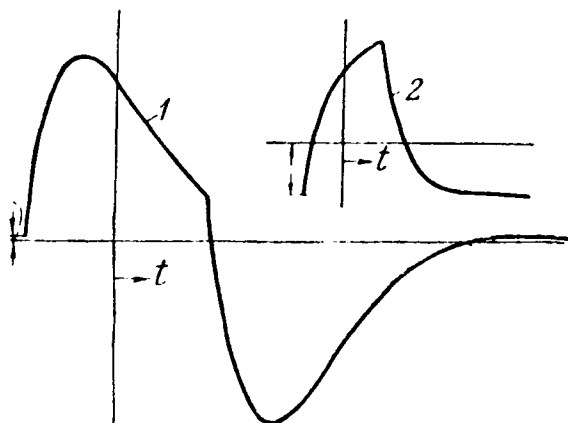


Рис. 3а. Расчетные кривые фазного напряжения инвертора.

1 — активно-индуктивная нагрузка: $B = 3,57$, $\cos \varphi = 0,67$;
2 — активная нагрузка $B = 2,01$.

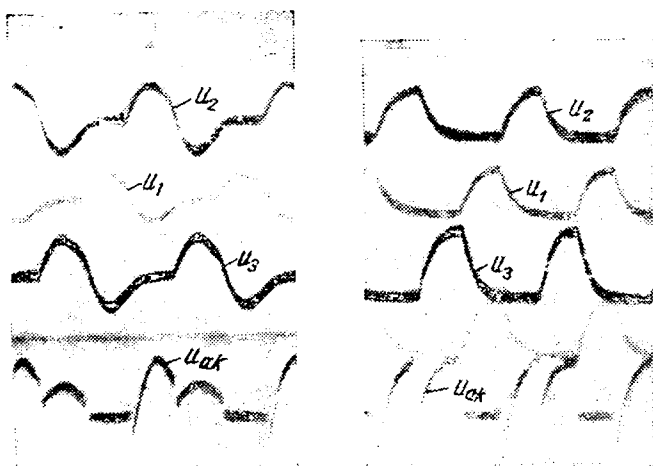


Рис. 3б. Осциллограмма кривых фазного напряжения, а также напряжения на вентиле инвертора при активно-индуктивной нагрузке.

$B \approx 3,57$, $\cos \varphi \approx 0,67$ (1) и активной нагрузке $B \approx 2,01$ (2).

трансформатора, возможно близкую к синусоиде. Этого можно достигнуть увеличением числа коммутаций вентилей за период переменного напряжения.

Инвертирование по трехфазной мостовой схеме (рис. 4). Очередность работы вентилей и фаз при мостовой схеме дана для справки

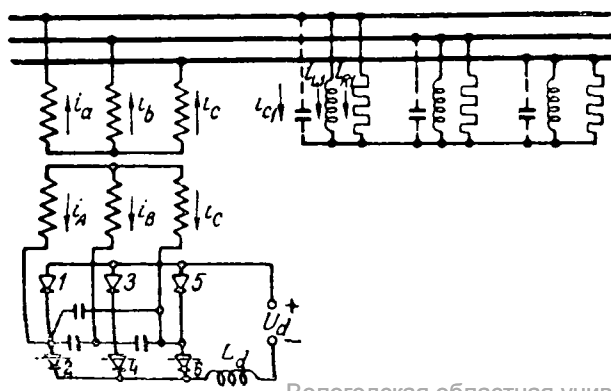


Рис. 4. Расчетная схема трехфазного мостового инвертора.

в таблице. Допущения те же, что и при доводании схемы звезда-звезда.

Порядок чередования вентилей и фаз мостов инвертора

| Интервал | Работающие | | Интервал | Работающие |
|---|------------|----------|--|------------|
| | вентили | фазы | | вентили |
| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| От $-\frac{t_0}{2}$ до $\frac{t_0}{2}$ | 2 и 3 | I и II | от $\frac{5}{2}t_0$ до $\frac{7}{2}t_0$ | 4 и 1 |
| От $\frac{t_0}{2}$ до $\frac{3}{2}t_0$ | 2 и 5 | I и III | от $\frac{7}{2}t_0$ до $\frac{9}{2}t_0$ | 6 и 1 |
| От $\frac{3}{2}t_0$ до $\frac{5}{2}t_0$ | 4 и 5 | II и III | от $\frac{9}{2}t_0$ до $\frac{11}{2}t_0$ | 6 и 3 |

Активная нагрузка. Случай активной нагрузки инвертора соответствует его работе в режиме преобразования постоянного тока в напряжение в постоянный ток другого назначения.

Рассмотрение ведем за время от $-\frac{t_0}{2}$ (рис. 5).

Если за время от $-\frac{t_0}{2}$ до $\frac{t_0}{2}$ работают I и II, то при $i_A = I_d$, $i_B = -I_d$, $i_C = 0$ и $i_a = I_d$, $i_b = -I_d$, $i_c = 0$. На основании этого получаем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_1}{dt} + \frac{1}{RC} u_1 - \frac{I_d}{C} &= 0, \\ \frac{du_2}{dt} + \frac{1}{RC} u_2 + \frac{I_d}{C} &= 0, \\ \frac{du_3}{dt} + \frac{1}{RC} u_3 &= 0. \end{aligned} \right\}$$

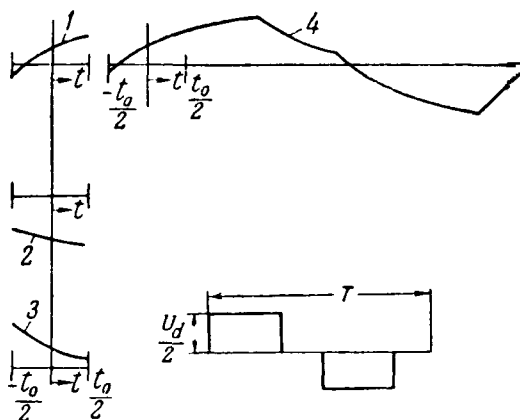


Рис. 5. Принципиальные кривые напряжения мостов инвертора при активной нагрузке.

1, 2, 3 — соответственно напряжения фаз I, II, III за время t_0 .

4 — напряжение фазы I за период T ; 5 — фазное напряжение коротком замыкании (в другом масштабе — вторичный фазный трансформатора при любой нагрузке).

Для рассматриваемого случая имеют место следующие граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} u_1 + u_2 + u_3 &= 0, \\ |u_2|_{t=-\frac{t_0}{2}} &= -|u_1|_{t=\frac{t_0}{2}}, \\ |u_1|_{t=-\frac{t_0}{2}} &= -|u_3|_{t=\frac{t_0}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Сделав постоянные интегрирования и установив связь между RI_a и параметрами нагрузки,

Активно-индуктивная нагрузка. В этом случае действительна система уравнений (6). Для определения постоянных интегрирования помимо условий (16) добавим следующие:

$$\left. \begin{aligned} i_{L_1} + i_{L_2} + i_{L_3} &= 0, \\ |i_{L_2}|_{t=-\frac{t_0}{2}} &= -|i_{L_1}|_{t=\frac{t_0}{2}}, \\ |i_{L_1}|_{t=-\frac{t_0}{2}} &= -|i_{L_3}|_{t=\frac{t_0}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Когда корни — сопряженные комплексы,

$$\begin{aligned} u_1 &= U_d \frac{(c't_0)^2}{2} e^{-at} \left\{ \frac{-e^{-\frac{at_0}{2}} \sin b \left(t - \frac{3}{2} t_0 \right) - e^{\frac{3}{2} at_0} \sin b \left(t + \frac{t_0}{2} \right) - e^{\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right)}{at_0 \sin 2bt_0 - bt_0 \operatorname{sh} 2at_0 + bt_0 \cos bt_0 \operatorname{sh} at_0 - at_0 \sin bt_0 \operatorname{ch} at_0} \right\}, \\ u_2 &= U_d \frac{(c't_0)^2}{2} e^{-at} \left\{ \frac{-e^{-\frac{3}{2} at_0} \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right) - e^{\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t - \frac{3}{2} t_0 \right) - e^{-\frac{at_0}{2}} \sin b \left(t + \frac{t_0}{2} \right)}{at_0 \sin 2bt_0 - bt_0 \operatorname{sh} 2at_0 + bt_0 \cos bt_0 \operatorname{sh} at_0 - at_0 \sin bt_0 \operatorname{ch} at_0} \right\}, \\ u_3 &= U_d \frac{(c't_0)^2}{2} e^{-at} \times \end{aligned} \quad (19)$$

$$\left\{ \frac{2e^{-\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right) \cos bt_0 - 2e^{\frac{at_0}{2}} \sin b \left(t + \frac{t_0}{2} \right) \cos bt_0 + e^{\frac{3}{2} at_0} \sin b \left(t + \frac{t_0}{2} \right) + e^{-\frac{3}{2} at_0} \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right)}{at_0 \sin 2bt_0 - bt_0 \operatorname{sh} 2at_0 + bt_0 \cos bt_0 \operatorname{sh} at_0 - at_0 \sin bt_0 \operatorname{ch} at_0} \right\};$$

здесь $-\frac{t_0}{2} \leq t \leq \frac{t_0}{2}$.

Из того, что в этом случае среднее значение разности инверторных напряжений тех фаз, которые связаны с вентилями, проводящими ток, время t_0 должно быть равно подведенному напряжению U_d :

$$U_d = \frac{1}{t_0} \int_{-\frac{t_0}{2}}^{\frac{t_0}{2}} (u_1 - u_2) dt,$$

Получаем формулы для определения инверторных напряжений:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= \frac{at_0(e^{at_0} + e^{-at_0} - 1) - at_0 e^{\frac{at_0}{2}} e^{-at}}{2at_0(e^{at_0} + e^{-at_0} - 1) + e^{-at_0} - e^{at_0}}, \\ U_d &= \frac{-at_0(e^{at_0} + e^{-at_0} - 1) + at_0 e^{-\frac{at_0}{2}} e^{-at}}{2at_0(e^{at_0} + e^{-at_0} - 1) + e^{-at_0} - e^{at_0}}, \\ U_d &= \frac{at_0 \left(e^{\frac{at_0}{2}} - e^{-\frac{at_0}{2}} \right) e^{-at}}{2at_0(e^{at_0} + e^{-at_0} - 1) + e^{-at_0} - e^{at_0}}, \\ a &= \frac{1}{CR}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

На рис. 6, 1 дана рассчитанная кривая инверторного напряжения. Сравнение этой кривой с кривой 2 рис. 3, а показывает резкое уменьшение гармонических в кривой напряжения, полученное только за счет схемы соединения, но за счет увеличения числа коммутаций вентилей за период с 3 до 6. Вологодская областная универсальная научная библиотека

Для примера (рис. 6, кривая 2) дано рассчитанное по (19) напряжение фазы I. Мы снова убеждаемся, что и в случае активно-индуктивной нагрузки увеличение числа коммутации вентилей приводит к улучшению фазного напряжения. Имея формулы для определения напряжений, легко получить формулы для токов.

Параметры схемы и нагружаемость инвертора. В несаморегулируемом инверторе с конденсаторной коммутацией так же, как и в инверторе, работающем параллельно с генерирующей сетью переменного тока, потенциал анода по отношению к катоду имеет в течение большей части периода T положительное значение (рис. 7). Непосредственно после погасания дуги в данном вентиле потенциал анода по отношению к катоду не должен принять положительного значения. В противном случае будет иметь место короткое замыкание инвертора.

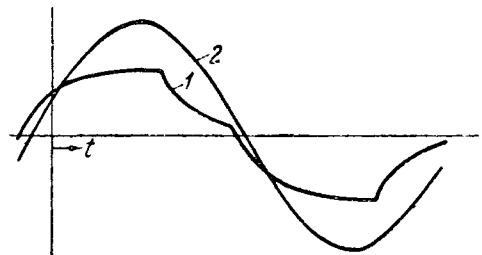


Рис. 6. Расчетные кривые фазного напряжения мостового инвертора при активной нагрузке и $B=2,01$ (1) и при активно-индуктивной нагрузке, $B=0,836$, $\cos \varphi=0,264$ (2).

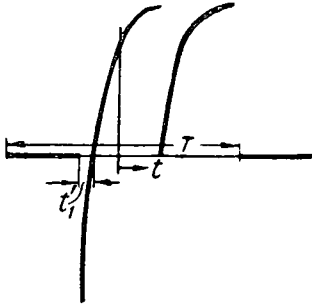


Рис. 7. Напряжение на вентиле 3 инвертора, соединенного по трехфазной схеме звезда-звезда.

Электрическая схема должна быть так рассчитана, чтобы после погасания дуги в данном вентиле анод по отношению к катоду некоторое время имел отрицательный потенциал. Если в течение этого времени в закончившем работу сосуде произойдет деионизация и сетка будет в состоянии запереть его (время деионизации), то этим самым обеспечивается нормальная работа инвертора.

Понятно, что нормальная работа схемы будет обеспечена, если время, предоставляемое для деионизации, будет равно или больше максимально возможного физического времени деионизации.

$$\operatorname{tg} bt' = \frac{-4 \cos bt_0 \sin \frac{bt_0}{2} \operatorname{ch} \frac{at_0}{2} + 2e^{\frac{3}{2}at_0} \sin \frac{bt_0}{2} - e^{-\frac{at_0}{2}} \sin \frac{3}{2}bt_0 + e^{\frac{at_0}{2}} \sin \frac{bt_0}{2} + e^{-\frac{3}{2}at_0} \sin \frac{bt_0}{2}}{4 \cos bt_0 \cos \frac{bt_0}{2} \operatorname{sh} \frac{at_0}{2} - e^{-\frac{at_0}{2}} \cos \frac{3}{2}bt_0 - 2e^{\frac{3}{2}at_0} \cos \frac{bt_0}{2} + e^{\frac{at_0}{2}} \cos \frac{bt_0}{2} + e^{-\frac{3}{2}at_0} \cos \frac{bt_0}{2}}$$

Рассмотрим только трехфазную мостовую схему. Итак, необходимо определить время, в течение которого напряжение между анодом и катодом $u_{ак}$ вентиля, закончившего свою работу, имеет отрицательное значение. Предварительно следует найти время прохождения напряжения $u_{ак}$ через нуль. Напряжение между анодом и катодом $u_{ак}$ может быть определено из следующих соображений.

В момент времени $-\frac{t_0}{2}$ происходит коммутация 6 и 2 вентилей (таблица). Вентиль 2 зажигается, вентиль 6 гаснет. Поэтому необходимо знать напряжение на вентиле 6 в течение времени от $-\frac{t_0}{2}$ до $\frac{t_0}{2}$. Оно, очевидно, будет равно разности напряжений фаз I и III. Положив

$$u_{ак_0} = u_1 - u_3 = 0, \quad (20)$$

найдем время прохождения напряжения на вентиле 6 через нуль. При активной нагрузке

$$e^{-at'} = \frac{e^{at_0} + e^{-at_0} - 1}{2e^{\frac{at_0}{2}} - e^{-\frac{at_0}{2}}}. \quad (21)$$

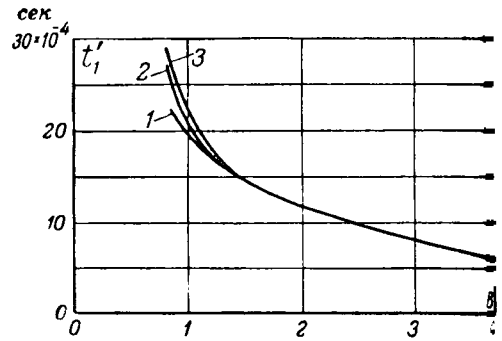


Рис. 8. Зависимость времени, предоставляемого для деионизации, от коэффициента загрузки при активной нагрузке.

1 — для схемы звезда-звезда; — по приближенной формуле; 3 — для мостовой схемы.

Время, предоставляемое для деионизации

$$t'_1 = \left| -\frac{t_0}{2} - t' \right|.$$

Формулу (21) можно упростить. При коэффициентах загрузки $B > 1,5$ получаем очень простую зависимость:

$$t'_1 \approx \ln 2CR.$$

Соответствующие формулы для активно-индуктивной нагрузки получим, если подставим значения u_1 и u_3 из (19) в (20). Для случая, когда корни — сопряженные комплексные, имеем:

Для иллюстрации на рис. 8 даны время, считанное по формуле (21), предоставляемое для деионизации в зависимости от коэффициента загрузки, и кривая, рассчитанная по приближенной формуле (23). Кривые совпадают при $B > 1,5$.

Пользуясь формулой (23), можно получить удобную формулу для определения типа конденсаторов при активной нагрузке

$$P_c = \frac{\omega t_1}{\ln 2} P_d,$$

где P_d — полезно потребляемая мощность

Внешняя характеристика инвертора и характеристика типовой мощности трансформатора. Рассмотрим сначала случай активной нагрузки. Фазное напряжение инвертора получится, если умножить действующее значение фазного тока вторичной обмотки трансформатора I на кажущееся сопротивление вторичной обмотки z_0 . Коэффициент искажения кривой фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора, определяемый как отношение действующего значения первой гармоники к действующему значению кривой тока, составляет: $\frac{I^{(1)}}{I} = 0,955$. Поэтому

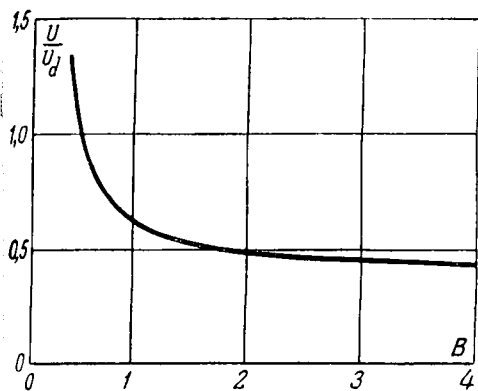


Рис. 9. Внешняя характеристика мостового инвертора при активной нагрузке.

ет рассмотрена только первая гармоника предполагается, что действующее значение первой гармоники равно действующему значению всей волны тока. Таким образом, $U = I z_0$. С другой стороны напряжение инвертора может быть выделено как произведение тока нагрузки на сопротивление: $U = I_R R$. Сравнивая эти выражения и преобразуя, получаем:

$$U = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{B}{\sqrt{1+B^2}} f(B) U_d, \quad (26)$$

$f(B)$ находят при определении $R I_d$. Функция имеет следующий вид:

$$f(B) = \frac{at_0(e^{at_0} + e^{-at_0} - 1)}{2at_0(e^{at_0} + e^{-at_0} - 1) + e^{-at_0} - e^{-at_0}}. \quad (27)$$

Для случая активно-индуктивной нагрузки

$$U = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{f(B, \cos \varphi)}{\omega \sqrt{1+B^2 - 2B \sin \varphi}} U_d. \quad (28)$$

Функция $f(B, \cos \varphi)$ принимает следующий вид для случая, когда корни — сопряженные комплексные:

$$f(B, \cos \varphi) = \frac{b(c't_0)^2 (\operatorname{ch} 2at_0 + \cos 2bt_0 - 2 \cos bt_0 \operatorname{ch} at_0 + 1)}{-at_0 \sin 2bt_0 + bt_0 \operatorname{sh} 2at_0 - bt_0 \cos bt_0 \operatorname{sh} at_0 + at_0 \sin bt_0 \operatorname{ch} at_0}. \quad (29)$$

Видно, что знаменатели в уравнениях (27) и (29) полностью соответствуют знаменателям (18) и (19).

Внешняя характеристика мостового инвертора дана на рис. 9, на котором представлена зависимость действующего значения напряжения инвертора от коэффициента загрузки.

Конечно, весьма легко получить зависимость $f(I_R)$, однако кривая $U = f(B)$ более показательна.

Рассмотрим теперь вопрос о типовой мощности трансформатора. Как указывалось, конденсаторы подключаются на первичной стороне, вследствие этого обе обмотки участвуют в передаче реактивной мощности, причем в неравной мере.

При расчете кажущейся мощности трансформатора учитывается не только реактивная мощность, определяемая временем, предоставляемым

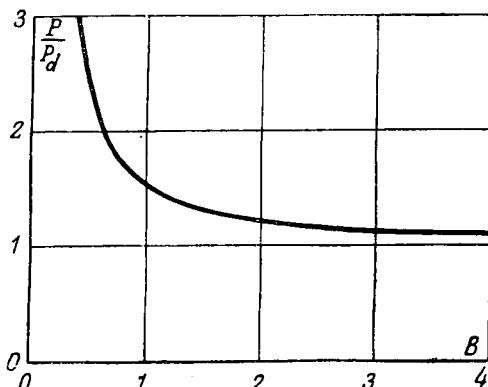


Рис. 10. Характеристика типовой мощности мостового инвертора при активной нагрузке.

для деионизации, но и реактивная мощность потребителя.

Если обе обмотки — первичная и вторичная — в равной мере участвуют в передаче реактивной мощности, определяемой $\cos \varphi$ потребителя, то в передаче мощности, определяемой временем, предоставляемым для деионизации, участвует только первичная обмотка. Однако для нашей цели определения типовой мощности трансформатора, имеющей ориентировочный характер, будем исходить из равенства расчетных мощностей обеих обмоток.

Принимая во внимание вышесказанное, фазную расчетную мощность при активной нагрузке можно определить по формуле

$$P_\phi = UI = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{B}{\sqrt{1+B^2}} f(B) U_d. \quad (30)$$

Окончательно типовая мощность определяется так:

$$P = 2 \frac{B}{\sqrt{1+B^2}} f(B) P_d, \quad (31)$$

где $f(B)$ определяется по формуле (27).

Для случая активно-индуктивной нагрузки.

$$P = 2 \frac{f(B, \cos \varphi)}{\omega \sqrt{1+B^2 - 2B \sin \varphi}} P_d. \quad (32)$$

здесь $f(B, \cos \varphi)$ определяется по формуле (29)

Для иллюстрации на рис. 10 представлено отношение типовой мощности к мощности постоянного тока P_d при активной нагрузке в зависимости от коэффициента загрузки.

Мы видим, что как напряжение, так и типовая мощность резко возрастают при малых коэффициентах загрузки. Это приводит к необходимости иметь специальные регуляторы для того, чтобы получить необходимую характеристику. Автор разработал простую схему для регулирования преобразователя, используемого для цели тяги. Однако изложение способов регулирования выходит за рамки статьи.

Заключение. Изложенная теория многофазных самоуправляемых инверторов с конденсаторной коммутацией подтверждается экспериментом.

Здесь изложена работа трехфазных инверторов. Однако теория справедлива для любой m -фазной системы.

Анализ показывает значительное преимущество многофазных преобразователей по сравнению с однофазными—улучшение формы кривой напряжения, уменьшение типовой мощности трансформатора, дросселя. Вот почему для электрической тяги наибольшее значение имеют многофазные преобразователи. Исследованная трехфазная мостовая схема в достаточной мере удовлетворяет решению задачи выбора схемы инвертора.

Приложение. 1. Вывод формулы для типовой мощности конденсаторов при активной нагрузке.

Исходя из формулы (13) и (23), для случая активной нагрузки получаем:

$$B = \frac{\ln 2}{\omega I_1'}$$

Коэффициент загрузки при активной нагрузке инвертора есть не что иное, как отношение активной мощности инвертора к реактивной мощности конденсаторов, в чем легко убедиться, если в формуле (13) числитель и знаменатель умножить на квадрат инверторного напряжения.

Тогда получаем:

$$P_C = \frac{\omega I_1'}{\ln 2} P_d$$

2. Пример определения типовой мощности конденсаторов мостового инвертора при активной нагрузке. Расчет ведем при 50 гц . Если положить время, предоставляемое для ионизации, равным $5,5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$, что в несколько раз физического времени деионизации современных рентгенов (такой запас необходим для получения нормальной работы инвертора), то получим из формулы (13)

$$P_C = \frac{314 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4}}{0,7} P_d \approx 0,25 P_d$$

3. Пример определения типовой мощности трансформатора мостового инвертора при активной нагрузке. При принятых в п. 2 определим прежде всего коэффициент загрузки

$$B = \frac{0,7}{314 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4}} = 4,02$$

Далее определяем функцию $f(B)$ по формуле

$$f(B) = \frac{4,17(65,4 + 0,016 - 1)}{8,34(65,4 + 0,016 - 1) + 0,016 - 65,4} = 0$$

Подставляя значения B и $f(B)$ в формулу (31), окончательно получаем:

$$P = 2 \frac{4,02 \cdot 0,57}{\sqrt{1 + 16,2}} P_d \approx 1,1 P_d$$

17



Упрощенный расчет дросселей насыщения

Кандидат техн. наук Д. И. МАРЬЯНОВСКИЙ

Всесоюзный нефтяной научно-исследовательский институт

инженер И. А. КАЗАНЦЕВА

Московский энергетический институт им. Молотова

Определение основных параметров дросселей насыщения может быть значительно упрощено в том случае, если они применяются для регулирования напряжения активной нагрузки и если заданы форма и размеры пластин, из которых собираются их сердечники. Несмотря на эти ограничения, область применения изложенного ниже расчета достаточно широка и охватывает практически расчет большинства дросселей насыщения, используемых как для непосредственного регулирования мощности силовых нагрузок, так и в качестве магнитных усилителей. Применение упрощенного расчета целесообразно, если нижний предел регулируемого напряжения нагрузки не выше примерно 25 ÷ 30 % его номинального значения.

Излагается упрощенный метод расчета, применимый для большинства дросселей насыщения, используемых для регулирования мощности силовой нагрузки. Предполагается, что задана форма и размеры пластин магнитопровода. Расчет ведется из условия обеспечения минимального и максимального значения регулируемого напряжения. Изложение иллюстрируется численным примером.

Расчет дросселя насыщения при заданной форме и размерах пластин сердечника и при известном включении его с активной нагрузкой сводится к делению основных параметров

метров, обеспечивающих нижний и верхние пределы (номинальное значение) регулируемого напряжения.

Основными подлежащими определению параметрами дросселя насыщения являются: толщина пакета магнитопровода и число витков обмотки постоянного и переменного тока. Задано напряжение сети, максимальное и минимальное значения регулируемого напряжения нагрузки, токи нагрузки, соответствующие этим напряжениям, и какие-либо два параметра, характеризующие обмотку постоян-

например, ее мощность и ток, соответствующие максимальному значению регулируемого напряжения.

Рассмотрим схему включения (рис. 1) дросселя насыщения. Здесь нагрузка 3 включена последовательно с обмоткой переменного тока I дросселя насыщения, магнитопровод которого охватывается потоком обмотки постоянного тока. Изменение напряжения нагрузки достигается изменением величины постоянного тока. Введем следующие обозначения:

U_c — напряжение сети; U_3 , U_2 и U_1 — напряжения нагрузки, подмагничивающей обмотки 2 и обмотки переменного тока I ; I_1 и I_2 — токи в регулируемой цепи (нагрузка и обмотка переменного тока дросселя насыщения) и в подмагничивающей обмотке; U_{1x} , U_{3x} и I_{1x} — значения напряжений U_1 , U_3 и тока I_1 при холостом ходе; $U_{1н}$, $U_{3н}$ и $I_{1н}$ — значения напряжений U_1 , U_3 и тока I_1 при номинальном режиме; $U_{3м}$ — значение напряжения нагрузки при максимальном значении регулируемого напряжения; $I_{2н}$ — значение постоянного тока подмагничивающей обмотки, при котором достигается максимальное напряжение нагрузки.

Если в первом приближении считать напряжение дросселя насыщения и нагрузки синусоидальными, то при чисто активной нагрузке напряжение дросселя насыщения при холостом

$$U_{1x} = \sqrt{U_c^2 - U_{3x}^2}. \quad (1)$$

пустим, что U_{3x} мало по сравнению с U_c . Если считать дроссель насыщения так, чтобы при холостом ходе на него приходилось напряжение, определяемое из равенства (1) и равное U_{1x} , то при небольшом расхождении между расчетом и фактически выполненного дросселя насыщения напряжение нагрузки может значительно отличаться от величины U_{3x} , т. е. от того значения, которое должно быть при холостом ходе.

Например, если заданное значение напряжения нагрузки при отсутствии тока в подмагничивающей обмотке равно, например, 10% напряжения сети, т. е. $U_{3x} = 0,10U_c$, то, как не трудно найти из равенства (1), напряжение дросселя насыщения $U_{1x} = 0,995U_c$.

Предположим, что при расчете допущена ошибка порядка 1%, т. е. в действительности дроссель насыщения рассчитан так, что при холостом ходе $U_{1x} = 0,985U_c$. Тогда напряжение нагрузки при отсутствии подмагничивающего тока соответственно будет $U_{3x} = 0,173U_c$ и, следовательно, ошибка в 1% вызовет расчетное изменение напряжения нагрузки на 73%.

Холостым ходом нагрузки назовем такой режим, в котором ток подмагничивающей обмотки равен нулю.

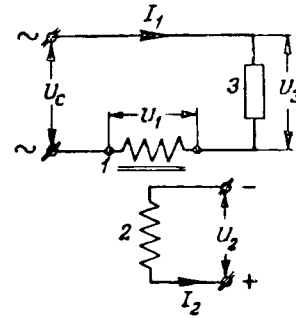


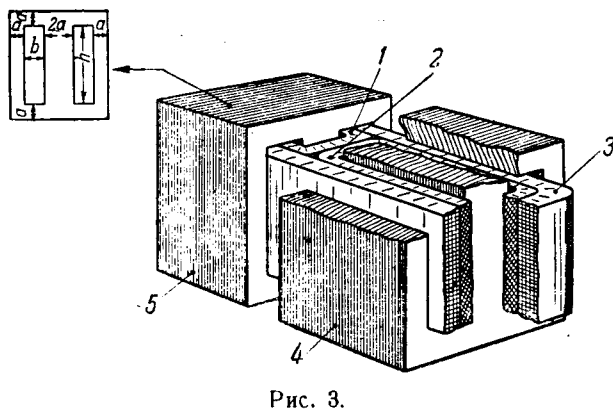
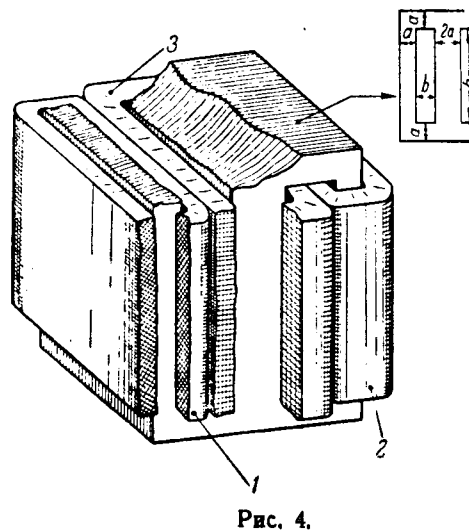
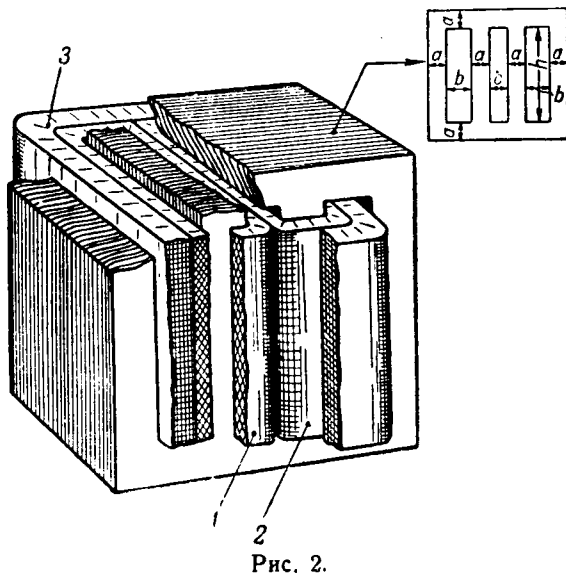
Рис. 1.

При расчете катушек со сталью расхождение между расчетными и экспериментальными результатами достигает иногда десятков процентов, поэтому, а также и вследствие того, что величины U_{1x} и U_{3x} на самом деле несинусоидальны, погрешности в определении напряжения нагрузки при отсутствии тока подмагничивания могут быть во много раз больше, чем в приведенном выше примере. Из этого примера видно, что при $U_{3x} = 0,1U_c$ напряжение, приложенное к дросселю насыщения, всего на 0,5% отличается от напряжения сети. При $U_{3x} = 0,25U_c$ эта разница, вычисленная по уравнению (1), составит немногим более 3%.

Таким образом, если нижний предел регулируемого напряжения относительно невелик, то напряжение дросселя насыщения при холостом ходе U_{1x} незначительно отличается от напряжения сети U_c . Поэтому допустим, что все напряжение сети U_c приложено непосредственно к обмотке переменного тока дросселя насыщения, и рассчитаем его так, чтобы ток, потребляемый этой обмоткой, был равен или был меньше I_{1x} — тока нагрузки при холостом ходе. Тогда при включении нагрузки последовательно с рассчитанным таким образом дросселем насыщения и при отсутствии тока в его подмагничивающей обмотке напряжение нагрузки будет меньше или равно U_{3x} — минимальному значению регулируемого напряжения.

Режим дросселя насыщения, при котором его обмотка переменного тока приключена непосредственно к сети, а ток подмагничивающей обмотки равен нулю, ничем не отличается от режима холостого хода обычного трансформатора. Определение некоторых параметров дросселя насыщения при этом может быть произведено так же, как и при расчете холостого хода трансформатора.

Как уже указывалось, дроссель насыщения должен быть рассчитан так, чтобы ток, потребляемый им при указанном выше режиме, не превосходил заданного значения. Это условие позволяет найти толщину пакета магнитопровода, если предварительно задаться числом витков обмотки переменного тока.



Чтобы определить толщину пакета, следует прежде всего вычислить значение индукции при холостом ходе. Эта величина определяется из кривой намагничивания

$$B_c = F(H_{1x}) = F\left(\frac{I_{1x} w_1}{l_1}\right), \quad (2)$$

непосредственно снятой на переменном токе, либо пересчитанной [Л. 1] из кривой, снятой на постоянном токе для того сорта листовой стали, из которого собирается сердечник. При этом должны быть учтены ампервитки, приходящиеся на воздушные зазоры в стыках магнитопровода.

В уравнении (2) введены следующие обозначения: B_c — максимальное значение индукции в той части магнитопровода, по которой проходит поток обмотки переменного тока, когда она подключена непосредственно к сети; w_1 — число витков этой обмотки; l_1 — длина средней силовой линии магнитного потока в см; $H_{1x} = \frac{I_{1x} w_1}{l_1}$ —

значение ампервитков обмотки переменного тока при холостом ходе на 1 см длины силовой линии.

Величины l_1 , I_{1x} и w_1 известны: первая определяется размерами пластин магнитопровода, вторая — током нагрузки при холостом ходе,

третьей, как указывалось выше, предварительно задаются. Очевидно B_c определяется по кривой намагничивания.

Толщина пакета определяется из уравнения

$$U_c = 4,44 f B_c Q_a w_1 \cdot 10^{-8}$$

где f — частота, гц;

Q_a — активное сечение, см², той части сердечника магнитопровода, по которой ходит поток обмотки переменного тока.

Уравнение (3) определяет Q_a , что позволяет найти толщину пакета. Предполагается, что размеры пластин сердечника соответствуют мощности регулируемой нагрузки. В противном случае толщина пакета будет либо слишком велика, либо слишком мала.

Покажем, из каких соображений можно дать величину w_1 или как ее вычислить.

Прежде всего заметим, что однофазный трансформатор с сердечником из трех- или четырехстержневого сердечника выполняется в виде одного из трех вариантов, представленных на рис. 2, 3 и 4, а его обмотка переменного тока в виде двух катушек, соединяемых последовательно или параллельно.

При четырехстержневом сердечнике (рис. 3) катушки переменного тока 1 и 2 располагаются на двух средних стержнях и охватываются моткой постоянного тока 3. Все четыре стержня имеют одинаковое поперечное сечение. Из четырех окон сердечника два крайних имеют большую площадь, а среднее — значительно меньше. Среднее окно занято только обмотками переменного тока, которые для лучшего использования активных материалов должны заполнять его как можно более плотно. Зная I_{1x} и задавшись плотностью тока, нетрудно найти поперечное сечение провода, а затем и то число витков w_1 , при котором среднее окно окажется полностью заполненным. Очевидно, что в этом случае w_1 вполне определяется размерами среднего окна.

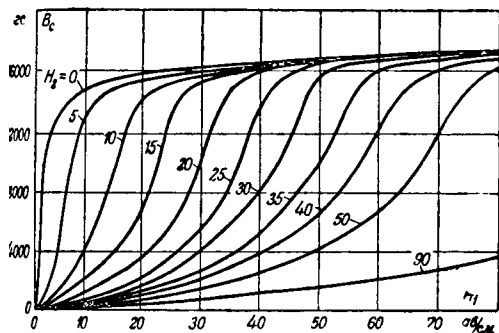


Рис. 5.

При любом варианте использования трех- или четырехсердечника в каждом из его окон (рис. 3 и 4) располагается обмотка постоянного тока, а одна из обмоток переменного тока. При такой конструкции следует задать отношение, в котором окно делится между этими обмотками. Площади, приходящиеся на каждую из обмоток, являются при этом известными. Тогда число витков w , можно найти, исходя из тех же соображений, что и для четырехсердечного сердечника.

Дроссели насыщения, включенные последовательно с нагрузкой мощностью от десятков до десятков и сотен киловатт, имеют коэффициент усиления по мощности, лежащий обычно в пределах от $10 \div 20$ до $100 \div 300$. Обмотка постоянного тока занимает при этом от 50 до 80% площади окна. Эти величины определяют пределы, в которых выбирается отношение площадей, занимаемых обмотками при трехсердечной конструкции сердечника.

Как будет показано ниже, по числу витков, размерам сердечника и размерам части окна, относящейся на обмотку постоянного тока, можно определить ампервитки и мощность этой обмотки, соответствующие номинальному режиму нагрузки. Если получившееся значение мощности окажется достаточно близким к заданному, то отношение, в котором разделена площадь окна, выбрано правильно, в противном случае его следует несколько изменить.

Покажем, как, зная площадь окна, отведенную для обмотки постоянного тока, и ампервитки, необходимые для доведения напряжения нагрузки до величины $U_{3н}$, найти мощность, соответствующую этим ампервиткам.

Мощность подмагничивающей обмотки дросселя насыщения, соответствующая номинальному режиму,

$$P_{2н} = I_{2н}^2 R_2. \quad (4)$$

где R_2 — активное сопротивление

$$R_2 = \frac{\lambda_2 w_2}{57 q_2},$$

где λ_2 — средняя длина витка, м;

q_2 — поперечное сечение обмоточного провода, мм².

Подставив значение R_2 в уравнение (4), получим:

$$P_{2н} = (I_{2н} w_2)^2 \frac{\lambda_2}{57 q_2 S_2}; \quad (5)$$

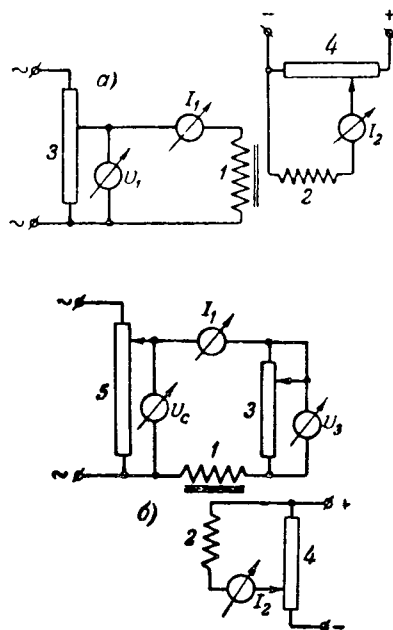


Рис. 6.

здесь $k_3 S_2 = q_2 w_2$, где S_2 — площадь, мм², той части окна, в которой помещается обмотка постоянного тока; k_3 — коэффициент заполнения, определяемый с достаточной точностью для некоторого диапазона поперечных сечений и формы (круглой или прямоугольной) обмоточного провода и его изоляцией. Среднюю длину витка λ_2 легко вычислить при известных размерах пакета и величине S_2 .

Покажем теперь, как могут быть найдены ампервитки подмагничивающей обмотки $I_{2н} w_2$, соответствующие номинальному напряжению нагрузки $U_{3н}$. Для определения этих ампервитков часто используются кривые, аналогичные изображенным на рис. 5. Такое семейство кривых может быть получено либо расчетом, исходя из кривой намагничивания предварительно аппроксимированной трансцендентной или алгебраической функцией [Л. 1 и 3], либо опытным путем по схеме рис. 6, а. Обмотка переменного тока 1 дросселя насыщения приключается к устройству 3 с плавно меняющимся напряжением. Для каждого значения этого напряжения вычисляется соответствующее значение индукции B_c и измеряется переменный ток I_1 , потребляемый дросселем насыщения при неизменном значении I_2 подмагничивающего тока обмотки 2.

Семейство кривых рис. 5 получится, если откладывать по оси ординат значения индукции, а по оси абсцисс — ампервитки обмотки переменного тока

$$H_1 = \frac{I_1 w_1}{l_1} \quad (6)$$

и строить каждую из кривых при постоянном значении ампервитков подмагничивающей обмотки

$$H_2 = \frac{I_2 w_2}{l_2}. \quad (7)$$

Величина I_2 равна длине средней силовой линии потока подмагничивающей обмотки, выраженной в сантиметрах. Значение H_2 , соответствующее каждой из кривых рис. 5, устанавливается потенциометром 4.

Экспериментально снятые семейства кривых для разных дросселей насыщения могут значительно отличаться как друг от друга, так и от аналогичных кривых, полученных путем вычислений.

Действительно, когда кривые рис. 5 строятся путем расчета, то при этом всегда допускают, что потоки проходят по сердечнику, нигде не замыкаясь помимо него. Между тем, в реальном дросселе насыщения по мере его намагничивания магнитная проницаемость сердечника изменяется, уменьшаясь от очень больших значений до величины, сравнимой с магнитной проницаемостью воздуха. При этом существенно меняется распределение магнитных потоков. Если значение магнитной проницаемости достаточно велико, то можно считать, что потоки обмоток постоянного и переменного тока проходят только по сердечнику. По мере увеличения подмагничивания все большая часть потока проходит по сердечнику не во всех его частях, а частично замыкаясь через окна сердечника, частично охватывая лобовые части обмоток. Величина той части потока, которая замыкается помимо магнитопровода, в очень большой степени зависит от формы сердечника (трех- или четырехстержневой), от относительных размеров пластин, в нем примененных, а в случае трехстержневой сердечника от взаимного расположения обмоток постоянного и переменного тока.

Поэтому для реальных дросселей насыщения кривые рис. 5 следует снимать экспериментально не только для определенного материала магнитопровода, но и для каждого определенного соотношения его размеров и взаимного расположения обмоток.

Ход расчета при определении ампервитков подмагничивающей обмотки будет следующий.

Зная U_c и $U_{3н}$, найдем $U_{1н}$ по формуле

$$U_{1н} = \sqrt{U_c^2 - U_{3н}^2} \quad (8)$$

и индукцию $B_{1н}$, соответствующую этому напряжению, из уравнения, подобного (3).

Отложим по оси ординат на рис. 5 максимальное значение индукции $B_{1н}$ в той части магнитопровода, по которой проходит поток обмотки переменного тока, когда она включена последовательно с нагрузкой, а по оси абсцисс — ампервитки обмотки переменного тока

$$H_{1н} = \frac{I_{1н} w_1}{l_1}$$

при номинальном режиме нагрузки.

Через точку с этими координатами проходит кривая, которой соответствует некоторое значение

$$H_{2н} = \frac{I_{2н} w_2}{l_2}$$

подмагничивающих ампервитков. Умножив найденное значение $H_{2н}$ на длину силовой линии, получим полные ампервитки подмагничивающей обмотки, равные $I_{2н} w_2$. Такой способ расчета дает значительные погрешности. Действительное использование уравнения (8) для определения $U_{1н}$ допустимо в предположении, что $U_{3н}$ значительно меньше, чем U_c , что в действительности нет. Показанное значение $B_{1н}$, найденное согласно (3), может значительно отличаться от значения индукции в сердечнике дросселя насыщения. Кроме того, используемое нами семейство кривых построено с помощью эксперимента, при котором, как это видно из рис. 6, а, напряжение, приложенное к обмотке переменного тока дросселя насыщения, и соответствующая ему индукция B_c синусоидальны. Между тем, в схеме на рис. 1 эта обмотка включается последовательно с активной нагрузкой, что не дает возможности определить погрешности подмагничивающих ампервитков; даже если откладывать по оси ординат на рис. 5 существующее в действительности значение индукции вместо $B_{1н}$. Таким образом, погрешности, вносимые изложенным выше расчетом, получаются вследствие того, что не учитывается влияние нагрузки. Учет нагрузки приведет к появлению еще одного переменного параметра, например, напряжения нагрузки U_3 или какого-либо другого ему эквивалентного помимо тех трех (B_c , H_1 , H_2), для которых построены кривые рис. 5.

Для каждого значения нового параметра должно быть построено соответствующее семейство кривых. Очевидно, что получение и использование такой серии семейств кривых будет практически затруднительно. Однако можно выбрать четыре независимых параметра, чтобы при значительных изменениях первого и фиксированных значениях второго и третьего, четвертый параметр менялся в относительно больших пределах, то можно получить вместо семейства кривых семейство областей, не покрывающих друг друга и ограниченных каждой двумя кривыми, соответствующими максимальному и минимальному значению первого параметра.

Выберем следующие четыре независимых параметра: B_c — индукцию в сердечнике дросселя насыщения, если бы он был приключен непосредственно к сети (выбранный параметр пропорционален напряжению сети U_c); $\frac{U_3}{U_c}$ — отношение напряжения нагрузки к напряжению сети. Эта величина всегда меньше единицы, как бы сильно был насыщен сердечник дросселя; H_1 — величина, определяемая равенством (6); $\frac{I_3 w_3}{I_1 w_1} = \frac{l_2 H_2}{l_1 H_1}$

отношение полных ампервитков обмоток постоянного и переменного тока.

Кривые, связывающие эти четыре параметра строятся так, как показано на рис. 7 и 8. По оси абсцисс откладывается величина B_c , а по

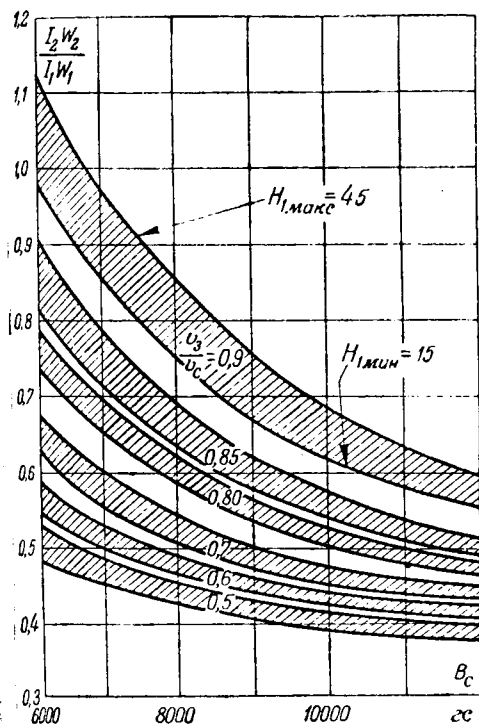


Рис. 7. Кривые построены для: конструкции дросселя насыщения согласно рис. 3, параллельного соединения обмоток переменного тока; частоты 50 гц; трансформаторной стали; пластин магнитопровода с размерами — $a=2$ см, $b=4$ см, $h=14$ см. Заштрихованные области ограничены кривыми

$$H_{1\max} = 45 \frac{a}{\text{см}} \quad \text{и} \quad H_{1\min} = 15 \frac{a}{\text{см}}.$$

Знаменатель — отношение $\frac{I_2 W_2}{I_1 W_1}$. Полагая, что отношение $\frac{U_2}{U_c}$ сохраняет постоянное значение, строят различные H_1 семейство кривых $\frac{I_2 W_2}{I_1 W_1} = f(B_c)$, которое заполняет некоторую область, ограниченную снизу и сверху двумя кривыми, соответствующими минимальному $H_1 = H_{1\min}$ и максимальному $H_1 = H_{1\max}$ значениям этого параметра.

Приведем некоторые соображения о выборе значений параметра H_1 для предельных кривых, ограничивающих упомянутую область.

Как указывалось выше, при четырехстержневых сердечниках среднее окно заполнено только обмоткой переменного тока. Если площадь этого окна умножить на коэффициент заполнения, то получится площадь поперечного сечения токопроводящего материала, который можно в нем разместить. Умножив полученную величину на истинную плотность тока и разделив ее на полную длину силовой линии, найдем значение H_1 , соответствующее размерам пластин магнитопровода.

Таким образом, если кривые строятся для пластин с заданными размерами (рис. 7, 8), то при использовании активных материалов значение H_1 для четырехстержневого сердечника практически может меняться в очень небольших

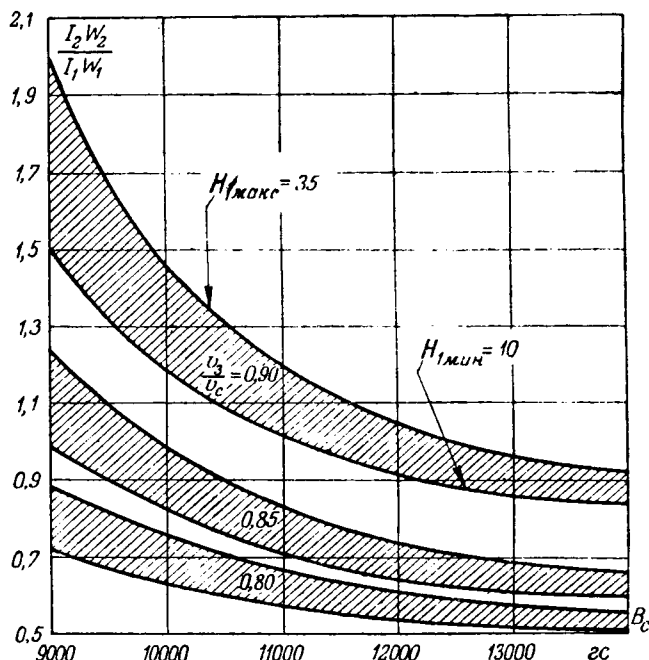


Рис. 8. Кривые построены для: конструкции дросселя насыщения согласно рис. 4; параллельного соединения обмоток переменного тока; частоты 50 гц; трансформаторной стали; пластин магнитопровода с размерами — $a=5$, $b=5$ и $h=20$ см. Заштрихованные области ограничены кривыми

$$H_{1\max} = 35 \frac{a}{\text{см}} \quad \text{и} \quad H_{1\min} = 10 \frac{a}{\text{см}}.$$

пределах, определяемых главным образом изменением коэффициента заполнения. При этом $H_{1\max}$ будет мало отличаться от $H_{1\min}$. Соответствующие кривые окажутся расположенными очень близко одна от другой и практически сольются в одну кривую, в которую и выродится ограничиваемая ими область.

Если семейство кривых строится для четырехстержневых сердечников, собранных из серии геометрически подобных пластин, то все размеры каждой пластины серии получаются путем умножения размеров какой-либо одной пластины на постоянные множители. Нетрудно убедиться в том, что умножением на эти же множители получаются и значения H_1 для каждой пластины этой серии. Таким образом, при одинаковом коэффициенте заполнения отношение $H_{1\max}$ к $H_{1\min}$ равно отношению соответствующих линейных размеров наибольшей и наименьшей из пластин, составляющих рассматриваемую серию.

При выполнении дросселя насыщения из одного или двух трехстержневых сердечников с пластинами заданных размеров $H_{1\max}$ и $H_{1\min}$ определяются пределами, в которых выбирается часть окна, занимаемая обмоткой переменного тока. Так, например, если обмотка переменного тока занимает от 20 до 50 % всей площади окна то отношение $H_{1\max}$ к $H_{1\min}$ должно быть не менее чем 2,5. Абсолютные значения этих величин определяются размерами окна.

Если трехстержневые сердечники собираются из серии геометрически подобных пластин, то

отношение $H_{1 \text{ макс}}$ к $H_{1 \text{ мин}}$, найденное, как показано выше, умножается еще на отношение соответствующих линейных размеров наибольшей и наименьшей пластин этой серии.

Кривые рис. 7 и 8 получены при помощи схемы на рис. 6,б. Обмотка переменного тока 1 дросселя насыщения, соединенная последовательно с активной нагрузкой 3, и подмагничивающая обмотка 2 питаются от источников переменного и постоянного тока 5 и 4 с плавно меняющимися напряжениями. Также может плавно меняться нагрузочное сопротивление 3.

Чтобы получить серию кривых при постоянном отношении $\frac{U_3}{U_c}$, следует прежде всего установить некоторое значение напряжения U_c , чем определится, во-первых, величина B_c , а во-вторых, из условия постоянства отношения $\frac{U_3}{U_c}$, то напряжение нагрузки U_3 , которое следует поддерживать. Далее меняется сопротивление нагрузки 3 и напряжение U_2 так, чтобы при получающихся при этом разных значениях I_1 напряжение нагрузки U_3 оставалось постоянным. Необходимые для этого подмагничивающие ампервитки $I_2 w_2$ пересчитываются из найденного по показаниям прибора тока I_2 и вычисляется отношение $\frac{I_2 w_2}{I_1 w_1}$, которым и определяется ордината искомой точки. Таким образом, получается ряд точек для разных H_1 , но при одном и том же значении B_c . После этого задаются рядом новых значений B_c , и для каждого из них повторяются аналогичные измерения и вычисления. Соединяя ряд точек для одинаковых H_1 , но разных B_c , получают семейство кривых, принадлежащих области, соответствующей определенному отношению $\frac{U_3}{U_c}$. Практически следует строить для каждой области только две ограничивающие кривые: для $H_1 = H_{1 \text{ макс}}$ и для $H_1 = H_{1 \text{ мин}}$. Точки, соответствующие другим значениям H_1 , лежащие между указанными пределами, можно с достаточной точностью находить при помощи линейной интерполяции.

Задавшись иными значениями отношения $\frac{U_3}{U_c}$, строят для них соответствующие области таким же способом.

Кривые рис. 7 и 8 строятся для определенной формы сердечника, соотношения размеров пластин, определенного расположения катушек и схемы их соединения. Кривые, полученные для пластин определенного размера, не меняются, если эти размеры пропорционально увеличивать или уменьшать. Иначе говоря, эти кривые действительны для ряда сердечников, собранных из пластин, геометрически подобных по форме. Толщина пакета может быть любая, однако не слишком мала по сравнению с линейными размерами пластин.

Различие между полученными экспериментально кривыми, приведенными на рис. 7 и 8, объясняется главным образом взаимным расположением

железа обмоток. Действительно, если выдросселя насыщения согласно рис. 4, то увеличение ампервитков обмотки потока все большая часть потока этой цепи начинает замыкаться через окна сердечника, меньшая часть — через крайние стержни, образом, когда магнитная проницаемость становится сравнимой с магнитной проницаемостью воздуха, увеличение подмагничивающей обмотки некоторой величины незначительно, что называется насыщением ядра и крайних стержней, увеличивая поток в среднем стержне, т.е. части магнитопровода, где поток обмотки переменного тока не проходит.

При выполнении дросселя насыщения на средние стержни сдвоенного сердечника являющаяся частью магнитопровода обмотки переменного тока. Поэтому при одинаковых ампервитках подмагничивания и при всех прочих равных условиях реактивное сопротивление этой обмотки оказывается меньше, а напряжение нагрузки больше соответствующих величин дросселя насыщения по рис. 4.

Для определения по кривым рис. 7 и 8 подмагничивающих ампервитков, необходимо получить номинального режима нагрузки, следует отложить по оси абсцисс значение B_c , найденное из уравнения (3), и из конца отложенного отрезка восстановить перпендикуляр, пересечением которого с кривой, соответствующей заданному

отношению $\frac{U_3}{U_c}$. На отрезке перпендикуляра, заключенном между кривыми, ограничивающими эту область, следует линейной интерполяцией найти точку для $H_{1 \text{ к}}$. Ордината этой точки дает искомое значение отношения $\frac{I_2 w_2}{I_1 w_1}$, по которому находят подмагничивающие ампервитки $I_2 w_2$.

Приведем численный пример расчета дросселя насыщения.

Пример. Допустим, что требуется рассчитать дроссель насыщения для регулирования напряжения лампы накального блока, состоящего из пяти ламп по 1000 вт каждая. Верхний предел регулируемого напряжения определяется номинальным напряжением ламп и составляет $U_{3 \text{ н}} = 1000 \text{ в}$, нижний предел — тем напряжением, при котором накала лампы становится в темноте невидимой. Это напряжение составляет примерно $U_{3 \text{ н}} = 7 \text{ в}$. Подмагничивающая обмотка питается от полупроводникового выпрямителя и ток ее не должен превышать $I_{2 \text{ н}} = 0,5 \text{ а}$. При номинальном напряжении лампового блока эта обмотка должна потреблять не более чем $P_{2 \text{ н}} = 40 \text{ вт}$.

Для компенсации падения напряжения в обмотке переменного тока дросселя насыщения при номинальном режиме нагрузки цепь, состоящая из этой обмотки и лампы накального блока, питается не непосредственно от сети через повысительный автотрансформатор с вторичным напряжением U_c . Зададимся величиной отношения $\frac{U_3}{U_c} = 0,85$, тогда $U_c = 141 \text{ в}$.

Сердечник дросселя насыщения имеет форму, показанную на рис. 4, и размеры $a = 5 \text{ см}$, $h = 20 \text{ см}$ и $b = 5 \text{ см}$. Подмагничивающая обмотка расположена на среднем стержне. Обмотка переменного тока выполняется в виде двух катушек, расположенных на крайних стержнях.

соединенных параллельно. Средняя длина силовой обмотки этой обмотки $l_1 = 100$ см.

Известно, что ток нагрузки при номинальном режиме

$$I_{1н} = \frac{5 \cdot 1000}{120} = 41,6 \text{ а.}$$

Предположим, что площадь окна разделена между обмотками постоянного и переменного тока так, что на первую приходится 70% общей площади окна, а на вторую — 30%. Задав плотность тока j , равной $1,5 \text{ а/мм}^2$, можно найти, что поперечное сечение провода обмотки переменного тока должно быть не менее чем $\frac{41,6}{2 \cdot 1,5} \approx 14,0 \text{ мм}^2$.

Зная размеры каркаса, найдем, что в части окна, отведенной для этой обмотки, может поместиться $w_1 = 10$ витков.

Параметры обмотки переменного тока, соответствующие номинальному режиму нагрузки, составят $I_{1н} = 41,6$ и $H_{1н} = 41,6$. Ток нагрузки при нижнем регулируемом напряжении определяется из вольт-амперной характеристики ламп накаливания и составляет около 26% тока нагрузки при номинальном режиме. По поставленным условиям напряжение не превышающее 7 в, должно сохраняться и при изменении выходной мощности или будут отключены лампы, т. е. когда номинальная мощность лампового источника составит только 3 000 вт. Отсюда ток нагрузки при нижнем пределе регулируемого напряжения составит:

$$I_{1х} = 0,26 \cdot \frac{3000}{5000} \cdot 41,6 = 6,5 \text{ а.}$$

Таким образом, для обеспечения минимального значения напряжения нагрузки должно соблюдаться следующее условие: при приключении обмотки переменного тока, если насыщения к напряжению, равному 141 в, потребляемый этой обмоткой при отсутствии тока намагничивающей обмотки, не должен превышать $I_{1х} = 6,5 \text{ а}$. Ампервитки, соответствующие этому

$$\text{составят } H_{1х} = 6,5 \frac{\text{ав}}{\text{см}}.$$

Несколько пониженная плотность тока принята для того, чтобы учесть дополнительный ток, текущий по контуру, образуемому параллельно соединенными обмотками переменного тока и не поступающий на нагрузку [Л. 1].

Из приведенного выше условия найдем индукцию B_c при холостом ходе, а затем и толщину пакета.

B_c можно найти из кривой намагничивания либо из кривой удельной намагничивающей мощности [Л. 2]. В этом примере получаем $B_c = 12500$ гс. Из уравнения (3) находим активное сечение сердечника $Q_a = 50,8 \text{ см}^2$ и толщину пакета, равную 107 мм.

Далее определим параметры подмагничивающей обмотки. Прежде всего находим, что заданному отношению $\frac{U_{3н}}{U_c}$ и полученным выше значениям B_c и $H_{1н}$ соответствует из кривых рис. 8 величина $\frac{I_{2н} w_2}{I_{1н} w_1} = 0,7$.

Отсюда подмагничивающие ампервитки при номинальном напряжении нагрузки $I_{2н} w_2 = 2900$.

Общая площадь поперечного сечения токопроводящего материала, который можно поместить в части окна, отведенной для обмотки постоянного тока, будет не более чем $q_2 w_2 = k_2 S_2 = 2500 \text{ мм}^2$. Средняя длина витка этой обмотки $\lambda_2 = 0,6 \text{ м}$. Подставив значения λ_2 и $k_2 S_2$ в уравнение (5), получим, что мощность подмагничивающей обмотки, соответствующая найденным выше ампервиткам $I_2 w_2 = 2900$, составит $P_{2н} \approx 35 \text{ вт}$. Получившееся значение мощности достаточно близко к заданному (40 вт). Из этого следует, что отношение, в котором разделена площадь окна между обмотками постоянного и переменного тока, выбрано правильно.

Предельное значение подмагничивающего тока составляет не более 0,5 а. Обмотка постоянного тока должна иметь не менее чем $w_2 = 5800$ витков с поперечным сечением провода $q_2 = 0,43 \text{ мм}^2$ и с сопротивлением $R_2 = 140 \text{ ом}$.

Литература

1. С. М. О с о в е ц. Проектирование и расчет дросселей насыщения, Электричество, № 5, 1948.
2. Г. Н. П е т р о в. Трансформаторы, Энергоиздат, т. I, стр. 193, 1934.
3. В. Д. Г у с а к о в. Об индуктивности дроссельной катушки, подмагничиваемой постоянным током, Электричество, № 19, 1935.

[25. 10. 1950]



Методика расчета регулирующих дросселей насыщения для стабилизации напряжения выпрямителей

Кандидат техн. наук М. Н. ГУБАНОВ

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

Дроссель насыщения и принцип его работы.

В различных областях техники получили широкое распространение дроссели насыщения, с помощью которых регулируют напряжение. Применение их особенно эффективно для стабилизации выходного напряжения полупроводниковых выпрямителей. Основное преимущество регулирующих дросселей насыщения состоит в том, что они осуществляют стабилизацию напряжения без переключения в цепи рабочего тока. Этим достигается полная надежность действия регулирующего устройства.

Регулирующие дроссели насыщения работают на принципе изменения их реактивного сопротивления путем подмагничивания постоянным током. Помимо обмотки W_{\sim} переменного тока они снабжены обмотками W_0 и $W_{ш}$ для подмагничивания постоянным током (рис. 1).

Обмотка W_{\sim} переменного тока включается последовательно в цепь рабочего переменного тока (рис. 1). Подмагничивающие обмотки свя-

Рассмотрена методика расчета регулирующих дросселей насыщения в части определения электрических параметров и размеров его по заданным условиям его работы. Выведены условия для определения оптимальных соотношений размеров дросселя. Приведен краткий числовой пример расчета дросселя.

заны с выходом выпрямителя посредством регулирующего элемента, например угольного регулятора. При этом к уменьшению э

ного выходного напряжения выпрямителя элемент должен автоматически увеличивать магнитное сопротивление дросселя. В результате напряжение на дросселе уменьшается, а напряжение на выходе выпрямителя увеличивается.

Если управляющий элемент может обеспечить необходимую кратность изменения тока в обмотке подмагничивающей обмотке W_0 , то дополнительной обмотки $W_{ш}$ не применяют. Магнитный поток, создаваемый обмоткой $W_{ш}$, должен быть направлен навстречу магнитному потоку обмотки W_0 .

Методика расчета элементов силовой цепи выпрямителя. Определение области намагничивания дросселя переменным током. Для дросселя насыщения заданы диапазон изменения выходного напряжения выпрямителя и диапазон изменения рабочего тока выпрямителя.

$$\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \delta,$$

стабилизированное выпрямленное напряжение U_0 , частота и напряжение сети f_c и U_c . Кроме того, должен быть задан сорт листовой стали, из которой будут изготавливаться проектируемые дроссели. Предварительно из этой стали изготовить образец дросселя с произвольными размерами и числом витков и снимают семейство кривых намагничивания (рис. 2)

$$U_{10} = f(H_n) \text{ при } H_{\sim} = \text{const.}$$

где H_n — напряженность поля подмагничивания, создаваемая токами обмоток W_0 и $W_{ш}$.

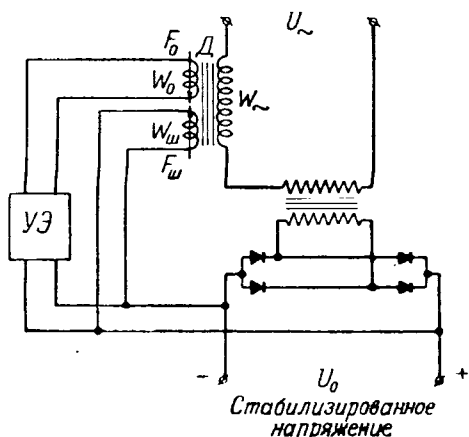
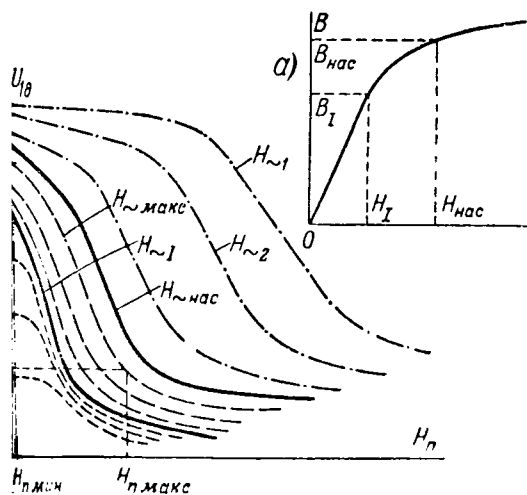


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования при помощи дросселя насыщения.

¹ Такие кривые снимаются для данного сорта стали один раз и ими можно пользоваться, аналогично кривым намагничивания, при различных расчетах.



Зависимость напряжения дросселя $U_{1\delta}$ от напряженности (постоянный ток) H_n при различных H_{\sim} ($H_{\sim 1} > H_{\sim 2} > H_{\sim 3}$).

- напряженность поля, создаваемая переменным током обмотки W_{\sim} (амплитудное значение);
- напряжение дросселя макета.

Разделяем полученное семейство кривых на области в соответствии с тремя областями намагничивания заданной стали (рис. 2, а): а) первая область — сталь не насыщена, индукция меняется от 0 до B_1 , а соответствующая напряженность до H_1 ; б) вторая область соответствует изгибу кривой намагничивания стали с перемены значения индукции от B_1 до $B_{нас}$; соответствующая напряженность меняется от H_1 до $H_{нас}$; в) третья область — сталь насыщена, значения индукции и напряженности определяются следующим образом:

$$B > B_{нас} \text{ и } H_{\sim} > H_{нас},$$

смотрим, в какой области целесообразна работа дросселя, чтобы получить наибольшее значение его напряжения с меньшими затратами меди. При работе в первой области необходимы небольшие значения H_{\sim} и H_n , что дает мало меди, но при этом слабо используется и мал диапазон изменения напряжения дросселя; во второй области нужны средние значения H_{\sim} и H_n , затраты меди сравнительно невелики, использование стали достаточное и диапазон изменения напряжения большой; работа в третьей области требует очень больших значений H_{\sim} и H_n , что ведет к большим затратам меди. Диапазон изменения напряжения дросселя получается почти такой же, как во второй об-

ласти изменения рабочих токов дросселя ($I_{макс} \div I_{мин}$) не укладывается в диапазон изменения H_{\sim} второй области,

$$\frac{I_{макс}}{I_{мин}} \approx \frac{I_{\sim макс}}{I_{\sim мин}} = \delta > \frac{H_{нас}}{H_1}. \quad (1)$$

В целях уменьшения веса стали дросселя насыщения целесообразно работать в третьей области. Это вытекает из следующих положений. В дросселе насыщения намагничивающая сила во много раз больше, чем в нормальном трансформаторе на те же напряжение и ток, так как намагничивающий ток в трансформаторе составляет только несколько процентов от его рабочего тока, а в дросселе он равен рабочему току. Следовательно, если в дросселе работать в той же области намагничивания, что и в трансформаторе, то вес стали дросселя может быть в 15 раз больше веса стали трансформатора той же мощности. Такое увеличение веса стали в дросселе насыщения, в особенности для больших мощностей, совершенно недопустимо. Отсюда следует, что если в трансформаторах малых мощностей работают во второй области и захватывают первую область, то в дросселе насыщения тех же мощностей необходимо работать в третьей области и захватывать в отдельных случаях вторую область; аналогично, если в трансформаторах больших мощностей работают во второй области, то в дросселях насыщения тех же мощностей необходимо работать только в третьей области. Эти положения дают возможность для заданной мощности дросселя насыщения выбрать область намагничивания — $H_{\sim мин}$ и $H_{\sim макс}$, в которой он должен работать.

Ширина этой области определяется заданным колебанием рабочего тока δ :

$$H_{\sim макс} = H_{\sim мин} \delta. \quad (2)$$

Область намагничивания постоянным током. Для более эффективного изменения напряжения дросселя его подмагничивание должно происходить в пределах максимального спада $U'_{1\delta}$ напряжения на кривых (рис. 2):

$$U_{1\delta} = f(H_n).$$

Аналитическое условие максимального спада напряжения будет:

$$U'_{1\delta} = \left(\frac{dU_{1\delta}}{dH_n} \right)_{макс}. \quad (3)$$

Поэтому при $I_{\sim мин}$ напряженность поля подмагничивания $H_{п. мин}$ должна соответствовать началу максимального спада напряжения на кривой с $H_{\sim мин}$, а при $I_{\sim макс}$ — концу максимального спада напряжения на кривой с $H_{\sim макс}$. В результате по кривым на рис. 2 определяем:

$$H_{п. мин} \text{ и } H_{п. макс}$$

Если управляющий элемент позволяет изменять ток основной обмотки в m раз, то напряженности поля $H_{0 \text{ макс}}$ и $H_{0 \text{ мин}}$ будут связаны следующим уравнением:

$$H_{0 \text{ макс}} = m H_{0 \text{ мин}} \quad (4)$$

где $H_{0 \text{ макс}}$ и $H_{0 \text{ мин}}$ — напряженности поля, соответствующие максимальному и номинальному току основной обмотки подмагничивания.

Суммарные напряженности поля подмагничивания будут определяться уравнениями:

$$H_{\text{п. макс}} = H_{0 \text{ макс}} - H_{\text{ш}} \quad (5)$$

$$H_{\text{п. мин}} = H_{0 \text{ мин}} - H_{\text{ш}} \quad (6)$$

где $H_{\text{ш}}$ — напряженность поля от тока дополнительной обмотки.

Из (4), (5) и (6) находим:

$$H_{0 \text{ макс}} = \frac{H_{\text{п. макс}} - H_{\text{п. мин}}}{1 - 1/m} \quad (7)$$

$$H_{\text{ш}} = \frac{H_{\text{п. макс}} - m H_{\text{п. мин}}}{m - 1} \quad (8)$$

$$H_{0 \text{ мин}} = \frac{H_{\text{п. макс}} - H_{\text{п. мин}}}{m - 1} \quad (9)$$

Диапазон изменения напряжения дросселя.

Найдя значения $H_{\text{ш. мин}}$, $H_{\text{ш. макс}}$, $H_{\text{п. мин}}$ и $H_{\text{п. макс}}$ по кривым на рис. 2, определим диапазон изменения напряжения макета-дросселя от максимального напряжения $U_{1 \text{ д. макс}}$ до минимального $U_{1 \text{ д. мин}}$.

При $I_{\text{ш. мин}}$ на кривой с $H_{\text{ш. мин}}$ отыскиваем напряжение $U_{1 \text{ д. макс}}$, соответствующее минимальному подмагничиванию $H_{\text{п. мин}}$; при $I_{\text{ш. макс}}$ на кривой с $H_{\text{ш. макс}}$ находим напряжение $U_{1 \text{ д. мин}}$, соответствующее максимальному подмагничиванию $H_{\text{п. макс}}$. Отсюда получаем отношение предельных напряжений:

$$\alpha = \frac{U_{1 \text{ д. макс}}}{U_{1 \text{ д. мин}}} \quad (10)$$

Найденная величина α не будет меняться, если, оставляя области намагничивания ($H_{\text{ш. мин}} \div H_{\text{ш. макс}}$, $H_{\text{п. мин}} \div H_{\text{п. макс}}$) неизменными, менять размеры и число витков дросселя.

Таким образом, при определении напряжения $U_{\text{д. макс}}$ и $U_{\text{д. мин}}$ проектируемого дросселя получаем дополнительное уравнение (10'):

$$\alpha = \frac{U_{\text{д. макс}}}{U_{\text{д. мин}}} \quad (10')$$

с помощью которого устраняется неопределенность расчета, имеющаяся в ряде работ, опубликованных в литературе.

Напряжение регулирующего дросселя и коэффициент трансформации. Воспользуемся диаграммой токов и напряжений для приведенной

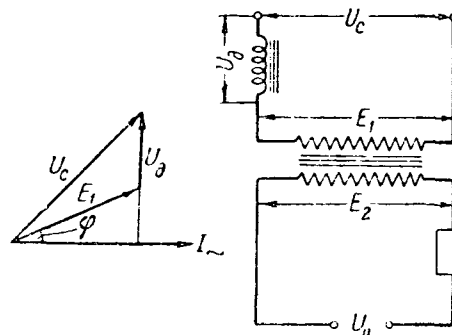


Рис. 3. Приведенная схема трансформатора и дросселя и векторная диаграмма токов и напряжений.

схемы трансформатора и дросселя выпрямителя (рис. 3), где E_1 и E_2 — э. д. с. трансформатора, x_0 и r_0 — реактивное и активное сопротивление трансформатора, приведенные ко вторичной обмотке; U_c — напряжение сети; $I_{\text{ш}}$ и φ — ток в обмотке трансформатора и угол φ относительно E_1 .

При построении диаграммы активным сопротивлением дросселя пренебрегаем по причине его малости по сравнению с реактивным сопротивлением дросселя. Кроме того, эти сопротивления находятся в квадратуре, что в большей степени уменьшает влияние активного сопротивления.

Из диаграммы находим:

$$(U_d + E_1 \sin \varphi)^2 + E_1^2 \cos^2 \varphi = U_c^2.$$

Рассмотрим уравнение (11) для двух предельных режимов: 1) напряжение сети имеет максимальное значение $U_{\text{с. макс}}$, а нагрузка выпрямителя — минимальное значение; 2) напряжение сети имеет минимальное значение $U_{\text{с. мин}}$, а нагрузка — максимальное значение.

Эти режимы требуют наибольший предел изменения напряжения дросселя насыщения. Поэтому его параметры должны определяться этими режимами.

Рассмотрим это более подробно.

При минимальной нагрузке $I_{\text{ш. мин}}$ выпрямителя значение φ будет максимальным $\varphi_{\text{макс}}$, а величина E_2 должна быть уменьшена с тем, чтобы обеспечить стабилизацию выходного напряжения выпрямителя при уменьшении в нем значения напряжения. Если при этом еще повысить напряжение сети до $U_{\text{с. макс}}$, то напряжение E_2 должно быть дополнительно уменьшено до $E_{2 \text{ мин}}$. Это предельное уменьшение является одним из условий, на которое должен быть рассчитан дроссель насыщения.

Вторым предельным условием, на которое также должен быть рассчитан дроссель, является максимальное увеличение E_2 до $E_{2 \text{ макс}}$ для компенсации падения напряжения в выпрямителе при повышении нагрузки его до $I_{\text{ш. макс}}$ с понижением напряжения сети до $U_{\text{с. мин}}$.

Для указанных режимов уравнение (11) переписывается следующим образом:

$$\left(aU_{д. мин} + \frac{E_{2 мин}}{n} \sin \varphi_{макс} \right)^2 + \frac{E_{2 макс}^2}{n^2} \cos^2 \varphi_{макс} = U_{с макс}^2, \quad (12)$$

$$\left(U_{д. мин} + \frac{E_{2 макс}}{n} \sin \varphi_{мин} \right)^2 + \frac{E_{2 макс}^2}{n^2} \cos^2 \varphi_{мин} = U_{с мин}^2, \quad (13)$$

$\alpha = \frac{E_2}{E_1}$ — коэффициент трансформации; α определяется уравнением (10).

При заданных напряжениях выпрямителя и зоне колебания его нагрузки величины $E_{1 макс}$ и $E_{2 мин}$ определяются расчетной нерегулируемой выпрямительной обмоткой.

Изменение напряжения сети является заданным. Следовательно, уравнения (12) и (13) будут иметь только два неизвестных $U_{д. мин}$ и n , которые при совместном решении уравнений легко

решить. В результате мы определили режимы, в которых дроссель должен работать ($H_{макс}$, $H_{мин}$, $n_{мин}$) и основные электрические данные дросселя и трансформатора ($U_{д. макс}$, $U_{д. мин}$), обеспечивающие стабилизацию напряжения выпрямителя.

Продуктивный расчет дросселя. Установив основные данные дросселя, переходим к его конструктивному расчету, к определению его длины и числа витков его обмоток. Предварительно найдем номинальное напряжение $U_{д. ном}$, которое он будет иметь при максимальной нагрузке $I_{макс}$ и отсутствии подмагничивания (рис. 2):

$$U_{д. ном} = U_{д. макс} \frac{U_{1д. ном}}{U_{1д. макс}}, \quad (14)$$

— соответствующее номинальное напряжение дросселя-макета.

Соотношение номинального напряжения дросселя и номинального соотношения

$$I_{д. ном} = 4,44 f B_{макс} S_d 2W_{макс} 10^{-8} \text{ в}, \quad (15)$$

и S_d — индукция и площадь поперечного сечения сердечника дросселя, $W_{макс}$ — число витков обмотки переменного тока.

Можно найти по кривой намагничивания — по значению $H_{макс}$, которое ранее определено. Следовательно, для определения уравнению (15) необходимо знать $W_{макс}$, которая связана только с объемом сердечника дросселя и совершенно не влияет

на объем стали. Это легко показать, если уравнение (15) умножить на длину силовой линии l_d :

$$l_d = \frac{\sqrt{2} I_{макс} W_{макс}}{H_{макс}}. \quad (16)$$

Тогда объем стали Q_c будет выражен формулой, в которую не входит $W_{макс}$:

$$Q_c = S_d l_d = \frac{U_{д. ном} I_{макс} \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{2}}{2 B_{макс} H_{макс} 4,44 f}. \quad (17)$$

Объем меди Q_m возрастает с увеличением $W_{макс}$ и S_d :

$$Q_m = W_{макс} \sqrt{S_d}. \quad (18)$$

После подстановки S_d из (15) в уравнение (18) получим:

$$Q_m = \sqrt{\frac{W_{макс} U_{д. ном} 10^8}{4,44 f B_{макс}^2}}. \quad (19)$$

Таким образом, для экономии меди надо брать величину $W_{макс}$ как можно меньше. Но, с другой стороны, при уменьшении $W_{макс}$ сечение катушки уменьшается в $W_{макс}$ раз, а площадь окна дросселя уменьшается пропорционально l_d^2 и, следовательно, в $W_{макс}^2$ раз [уравнение (16)]; поэтому при очень малом значении $W_{макс}$ нельзя разместить обмотку дросселя.

Следовательно, для возможности уменьшения $W_{макс}$ необходимо, чтобы площадь S_d при заданной длине l_d была бы максимальной (рис. 4). Это будет при равенстве сторон сердечника

$$h = b = \frac{l_d}{4}. \quad (20)$$

Площадь окна может быть выражена в следующем виде:

$$S_o = \frac{l_d^2}{16} \gamma, \quad (21)$$

где

$$\gamma = \left(1 - \frac{4c_1}{l_d} \right)^2. \quad (22)$$

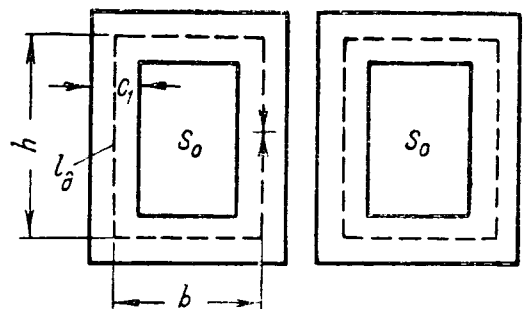


Рис. 4. Сердечник проектируемого дросселя.

Величина γ практически изменяется в очень небольших пределах, примерно от 0,3 до 0,4. Как показали проведенные расчеты, значения γ в этих пределах дают хорошие результаты. Определение c_1 и γ может быть произведено более точным, но сложным способом (приложение 1). Напишем условие размещения катушек дросселя в его окне:

$$S_o \geq (W_{\sim} q_{\sim} + W_0 q_0 + W_{ш} q_{ш}) \frac{1}{\beta}; \quad (23)$$

здесь q_{\sim} , q_0 , $q_{ш}$, W_{\sim} , W_0 и $W_{ш}$ — сечение проводников и числа витков соответствующих обмоток дросселя;

β — коэффициент заполнения.

Принимая одинаковую плотность тока для всех обмоток и учитывая равенство (24),

$$\begin{aligned} I_o &= \frac{W_{\sim} \sqrt{2} I_{\sim \text{макс}}}{H_{\sim \text{макс}}} = \frac{W_0 I_{0 \text{макс}}}{H_{0 \text{макс}}} = \\ &= \frac{W_{ш} I_{ш}}{H_{ш}}, \end{aligned} \quad (24)$$

где $I_{0 \text{макс}}$ и $I_{ш}$ — токи основной и дополнительной обмоток, можно написать уравнение (23) в следующем виде:

$$\begin{aligned} S_o &\geq \frac{W_{\sim} q_{\sim}}{\beta} \left(1 + \frac{H_{0 \text{макс}} \sqrt{2}}{H_{\sim \text{макс}}} + \frac{H_{ш} \sqrt{2}}{H_{\sim \text{макс}}} \right) = \\ &= \frac{W_{\sim} k}{\beta}, \end{aligned} \quad (25)$$

где k — известная величина.

Из уравнения (21) и (25) имеем:

$$\frac{l_o^2}{16} \gamma \geq \frac{W_{\sim} k}{\beta}. \quad (26)$$

После подстановки l_o из уравнения (16) получим:

$$W_{\sim} \geq \frac{8kH_{\sim \text{макс}}^2}{\gamma \beta I_{\sim \text{макс}}^2}. \quad (27)$$

Уравнение (27) дает крайний предел, до которого можно уменьшить величину W_{\sim} . Таким образом, значение W_{\sim} ограничивает, с одной стороны, уравнение (27), по которому W_{\sim} должно быть не меньше определенной величины, с другой, — условие минимума меди, по которому следует брать W_{\sim} как можно меньше [уравнение (19)]. Эти два условия позволяют определить значение W_{\sim} , а следовательно, по уравнению (15) и величину S_o .

Из уравнений (16) и (20) находим остальные размеры дросселя l_o , h и b , а затем намагничивающие силы дополнительной и основной обмоток:

$$\left. \begin{aligned} F_{ш} &= I_o H_{ш}, \\ F_{0 \text{макс}} &= I_o H_{0 \text{макс}} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Таким образом, рассмотренная методика позволяет определить все электрические и конструктивные данные дросселя.

Приложение 1. Определение оптимального значения c_1 . Введем обозначение $\frac{b_1}{c_1}$ b_1 и c_1 — размеры сечения дросселя:

$$S_o = c_1 b_1 = c_1^2 m.$$

Длину витка обмотки W_{\sim} можно примерно равной:

$$l_o = \sqrt{S_o} \left(1 + \frac{1}{m} \right) 2 \sqrt{m}$$

Объем меди

$$Q_m = W_{\sim} I_o q_{\sim} = W_{\sim} q_{\sim} 2(m+1)c_1.$$

Из уравнения (1а) и (15) находим:

$$m = \frac{U_{\text{д.ном}} \cdot 10^8}{4,44 f B_{\sim \text{макс}} c_1^2 W_{\sim} \cdot 2} = \frac{a_1}{c_1^2 W_{\sim}},$$

где

$$a_1 = \frac{U_{\text{д.ном}} \cdot 10^8}{4,44 f B_{\sim \text{макс}} \cdot 2}.$$

Подставляем в уравнение (3а)

$$Q_m = 2q_{\sim} \frac{W_{\sim} c_1 (a_2 + c_1^2 W_{\sim})}{c_1^2 W_{\sim}} = 2q_{\sim} \left(\frac{a_2}{c_1} + c_1 W_{\sim} \right).$$

Из (22) и (26) имеем:

$$\frac{W_{\sim} k}{\beta} \approx \frac{l_o^2}{16} \left(1 - \frac{8c_1}{l_o} \right).$$

После подстановки из уравнений (16)

$$l_o = \frac{\sqrt{2} I_{\sim \text{макс}} W_{\sim}}{H_{\sim \text{макс}}} = a W_{\sim},$$

получим

$$\frac{W_{\sim} k}{\beta} \approx \frac{a^2 W_{\sim}^2}{16} \left(1 - \frac{8c_1}{a W_{\sim}} \right).$$

Отсюда находим значение W_{\sim} :

$$W_{\sim} = \frac{16k}{\beta a^2} + \frac{8c_1}{a}.$$

После подстановки W_{\sim} из (9а) в (6а) получим

$$Q_m = \frac{2q_{\sim} a_2}{c_1} + \frac{32 q_{\sim} k c_1}{\beta a^2} + \frac{16 q_{\sim} c_1^2}{a}.$$

Для минимального значения Q_m имеем два:

$$1) \frac{dQ_m}{dc_1} = 0 \quad \text{и} \quad 2) \frac{d^2 Q_m}{dc_1^2} > 0.$$

Первое условие дает:

$$\frac{dQ_m}{dc_1} = -\frac{2q_{\sim} a_2}{c_1^2} + \frac{32 q_{\sim} k}{\beta a^2} + \frac{32 q_{\sim} a}{a} = 0.$$

Из уравнения (12а) определяют оптимальное значение c_1 , определяем W_{\sim} из (9а) и по (4а) находим размеры сечения S_o .

нажем, что второе условие (11а) также удовлетво-

$$\frac{d^2 Q_m}{dc_1^2} = \frac{4q_- a_2}{c_1^3} + \frac{32q_-}{a}. \quad (13а)$$

и всегда q_- , a_2 , a и c_1 имеют положительные значения, следовательно, по (13а)

$$\frac{d^2 Q_m}{dc_1^2} > 0.$$

Положение 2. Пример расчета дросселя. Для расчета дросселя насыщения для стабилизации напряжения селенового выпрямителя на 120 в при нагрузке в пределах 1—3 а.

Известны основные параметры дросселя. Для сердечника дросселя трансформаторную выбираем $H_{н.мин} = 3,25$ а/см. Если $\delta = 3$, то $\delta = 9,75$ а/см.

В данной трансформаторной стали начало резкого спада кривой $U_{10} = f(H_n)$ при $H_{н.мин} = 3,25$ а/см, когда $H_{н.мин} = 0,48$ а/см; конец резкого спада кривой при $H_{н.макс} = 9,75$ а/см происходит при $H_{н.макс} = 5,4$ а/см. В соответствии с этим по кривым определяем величину

$$\alpha = \frac{U_{10.макс}}{U_{10.мин}} = \frac{18}{10} = 1,8.$$

Из того, по кривой $H_{н.макс} = 9,75$ а/см при $H_n = 0$ что $U_{10.ном} = 30$ в.

Из данных, полученных при расчете обычного дросселя (здесь не приводится), $E_{2.макс} = 121$ в, $\cos \varphi_{мин} = 0,93$, $\cos \varphi_{макс} = 0,945$, $E_{2.мин} = 108$ в, $\sin \varphi_{макс} = 0,9$. Указанные величины для расчета являются заданными. Линейное напряжение будем равным 120 в.

Подставив эти значения в уравнения (12) и (13), $H_{н.мин} = 11,68$ в; $n = 1,87$; $U_{д.макс} = 21$ в. Если нагрузка изменяется в пределах от $U_{с.мин}$ до $U_{с.макс}$, подставив их значения в (12) и (13), аналогично найдем величину $U_{д.мин}$ и n .

Далее определим H_0 и $H_{ш}$. Предположим, что управляющий элемент (например, угольный регулятор) обеспечивает изменение тока в основной обмотке в шесть раз. ($m = 6$). Тогда, пользуясь (7), (8) и (9), найдем $H_{0.макс} = 6,0$ а/см; $H_{ш} = 0,5$ а/см и $H_{0.мин} = 1,0$ а/см.

После этого вычислим величину $I_{н.макс}$ при условии, что выпрямитель выполнен по трехфазной мостовой схеме, а обмотки трансформатора соединены по схеме звезды-треугольник:

$$I_{н.макс} = 3 \cdot 0,47 \cdot 1,87 = 2,65 \text{ а}.$$

Конструктивный расчет дросселя. Вначале определим величину k согласно (25). Задавшись нормальной плотностью тока в обмотках равной 200 а/см², имеем:

$$k = \frac{2,65}{200} \cdot \left(1 + \frac{6,0 \cdot 1,4}{9,75} + \frac{0,5 \cdot 1,4}{9,75}\right) \approx 0,025 \text{ см}^2.$$

Подставив k в (27) и полагая $\beta = 0,18$ и $\gamma = 0,3$, получим:

$$W_{\sim} \geq \frac{8 \cdot 0,025 \cdot 9,75^2}{0,3 \cdot 0,18 \cdot 2,65^2} = 53 \text{ витка}.$$

Пользуясь (15), подсчитаем величину S_d . Предварительно с помощью (14) найдем значение $U_{д.ном}$:

$$U_{д.ном} = \frac{21 \cdot 30}{18} = 35 \text{ в}.$$

Тогда

$$S_d = \frac{U_{д.ном} 10^8}{2 \cdot 4,44 f B_{н.макс} W_{\sim}} = \frac{35 \cdot 10^8}{2 \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 13 \cdot 000 \cdot 53} = 11 \text{ см}^2.$$

Здесь $B_{н.макс} = 13 \cdot 000$ гс определено по кривой намагничивания трансформаторной стали при $H_{н.макс} = 9,75$ а/см;

Далее по (16) и (20) находим, что $l_d = 22$ см $h = b = 5,5$ см.

Наконец, с помощью (28) вычисляем н. с. дополнительной и основной обмоток дросселя: $F_{ш} = 11$ ампервитков и $F_{0.макс} = 132$ ампервиткам.

Число витков и сечение провода в обмотках определяем обычным способом.

[27. 9. 1950]



Релейный эффект в цепи с термосопротивлением

Кандидат техн. наук Г. К. НЕЧАЕВ

Институт электротехники Академии наук УССР

сопротивлениями и температурозависимые сопротивления, изготовленные из полупроводников и полупроводников, почти все

металлов и ряд их сульфидов. В табл. 1 приведены основные характеристики ряда полупроводников, служащих для изготовления термосопротивлений.

Термосопротивлений выпускаются различных типов и исполнений. Некоторые термосопротивления монтируются в стеклянном баллоне, другие — в вакуумных и газонаполненных. Наша

Рассматривается возможность получения при известных условиях релейного эффекта в цепи с термосопротивлением. Разбирается качественная сторона этого явления и показаны примеры использования релейного эффекта для решения некоторых задач автоматики.

промышленность выпускает различные типы термосопротивлений. Технология, характеристики и параметры термосопротивлений достаточно подробно освещались в литературе [Л. 1, 2, 3, 4].

Сопротивление термосопротивления в весьма сильной степени зависит от его температуры и в довольно широких пределах подчиняется зависимости

$$R = R_{\infty} e^{\frac{B}{T}}; \quad (1)$$

здесь R_{∞} — условное сопротивление термосопротивления соответствующее $T = \infty$;

T — температура термосопротивления $^{\circ}\text{K}$;
 B — коэффициент, характеризующий свойства материала.

Таблица 1

| Химическая формула полупроводника | Проводимость σ , $\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$ | Температурный коэффициент α_T при 20°C , % |
|--------------------------------------|---|---|
| Ag_2S | $2,0 \cdot 10^{-3}$ | $-(3,8 \div 5)$ |
| $\text{CuO} + \text{Mn}_2\text{O}_4$ | $10^{-1} \div 10^{-2}$ | $-(3 \div 3,2)$ |
| UO_2 | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $-3,2$ |
| CuO | $10^{-2} \div 10^{-6}$ | $-2,6$ |
| $\text{Mn}_2\text{O}_4 + \text{NiO}$ | $1,0 \cdot 10^{-3}$ | $-3,2$ |
| $\text{TiO}_2 + \text{MgO}$ | $1,6 \cdot 10^{-2}$ | $-1,3$ |
| ZnO | 1,0 | $-0,8$ |
| $\text{CuO} + \text{Cr}_2\text{O}_3$ | $1,0 \cdot 10^{-3}$ | $-2,8$ |

С достаточной точностью можно принять, что в диапазоне до $300-350^{\circ}\text{C}$ теплоотдача в окружающую среду пропорциональна коэффициенту теплоотдачи и разности температур термосопротивления и окружающей среды:

$$P_1 = \alpha(T - T_0), \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи термосопротивления;

T — температура термосопротивления, $^{\circ}\text{K}$;

T_0 — температура окружающей среды. В любой момент времени мощность, выделяющаяся в термосопротивлении,

$$P_2 = I_m^2 R_m = \frac{U_m^2}{R_m}, \quad (3)$$

где I_m — ток;

U_m — напряжение на термосопротивлении.

В установившемся режиме $P_1 = P_2$ и из (1), (2) и (3) получаем:

$$U_m = \sqrt{\alpha(T - T_0) R_m e^{\frac{B}{T}}}, \quad (4)$$

$$I_m = \sqrt{\frac{\alpha}{R_m} (T - T_0) e^{\frac{B}{T}}}. \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) дают в параметрической форме вольтамперную характеристику. Для построения кривой $U_m = f(I_m)$ необходимо исследовать уравнения на максимум и минимум. Берем производную $\frac{dU_m}{dT}$ и приравняем ее нулю. В результате получим уравнение

$$T^2 - BT + BT_0 = 0. \quad (6)$$

Корни уравнения будут:

$$T = \frac{B}{2} \pm \sqrt{\frac{B^2}{4} - BT_0}. \quad (7)$$

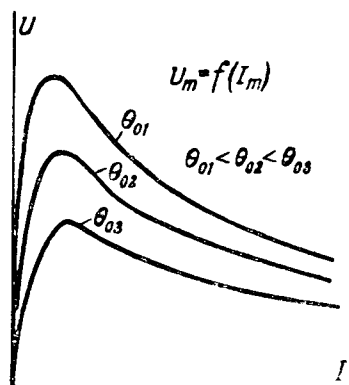


Рис. 1

Таким образом, на основании (4), (5) и (7) построить вольтамперную характеристику сопротивления (рис. 1).

Из формул (4), (5) и (7), а также экспериментально можно установить, что вольтамперная характеристика значительно деформируется изменением температуры окружающей среды и коэффициента теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи может изменяться вследствие изменения состояния окружающей среды, на скорости среды, теплоемкости.

На рис. 1 показано семейство вольтамперных характеристик при различных значениях θ_0 — температура в $^{\circ}\text{C}$. Отмечено, что при повышении θ_0 ординаты характеристик уменьшаются. Наибольшее изменение испытывает левая точка перегиба характеристики. Кривые можно получить расчетным путем по формулам (4), (5) и экспериментально.

При изменении коэффициента теплоотдачи также происходит деформация характеристик. С ростом α ординаты характеристик увеличиваются (рис. 2). Это свойство вольтамперной характеристики позволяет получить релейный эффект в некоторых цепях с термосопротивлением, содержащих линейное сопротивление.

Под релейным эффектом мы понимаем увеличение или уменьшение тока в цепи, вызываемое изменением параметров элементов данной цепи.

Релейный эффект может быть вызван изменением: 1) напряжения, приложенного к цепи; 2) температуры окружающей среды; 3) коэффициента теплоотдачи термосопротивления.

Рассмотрим первый случай. Предположим термосопротивление соединено последовательно с линейным сопротивлением. Поведение цепи при изменении питающего напряжения можно изобразить графически. На рис. 3, а нанесена вольтамперная характеристика. Для такой цепи справедливо соотношение

$$U_m = U - Ir.$$

Таким образом, ток цепи определяется пересечением характеристик

$$U_m = f_1(I_m) \text{ и } f_2(I) = U - Ir.$$

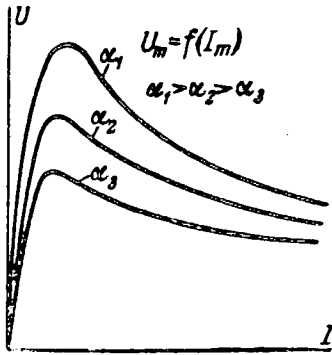


Рис. 2

напряжение питания ниже напряжения перегиба характеристики $U_{m, \max}$, то ток в цепи определяется точкой 1 (рис. 3, а). При дальнейшем повышении напряжения в некоторых пределах будет сравнительно небольшое увеличение тока. По достижении напряжения величины U_2 мы получим касание характеристик в точке пересечения в точке 3. Как видно, точка 2 характеризует неустойчивое состояние цепи, так при малейшем увеличении напряжения произойдет лавинообразное нарастание тока, и цепь перейдет в состояние, характеризуемое точкой 3. Ток цепи может увеличиться даже в несколько раз в зависимости от параметров схемы. Этот лавинообразный процесс объясняется нарушением энергетического баланса, т. е. при некоторых условиях нарушается равенство энергии, потребляемой в термосопротивлении и отдаваемой окружающей среде. Обратный скачок тока происходит при уменьшении напряжения, подводящего к схеме, до значения U_3 , но в этом случае U_3 будет всегда меньше U_2 . Подробный анализ этого явления будет дан ниже.

Другой случай релейного эффекта может быть получен при изменении температуры окружающей среды.

Рассмотрим цепь из термосопротивления и линейного сопротивления (рис. 3, б). Как и в предыдущем случае, ток цепи определяется пересечением характеристик $U_m = f(I_m)$ и $f_2(I) = U - Ir$. Допустим, что цепь включена на напряжение U , температура окружающей среды θ_{01} . В таком случае ток цепи определяется точкой 1. Затем мы повышаем температуру среды. По достижении температуры θ_{02} получим касание характеристик в точке 2 и пересечение в точке 3. Как точка 2 характеризует неустойчивое состояние цепи, то ток со значения I_2 скачком переходит до значения I_3 . Таким образом, происходит многократное увеличение тока, вызванное нарушением энергетического баланса термосопротивления, т. е. явление, подобное первому, но вследствие другой причины. Обратный скачок тока получим при понижении температуры окружающей среды до значения θ_{03} , при котором $\theta_{03} < \theta_{02}$.

При понижении температуры окружающей среды ординаты характеристики растут так, что

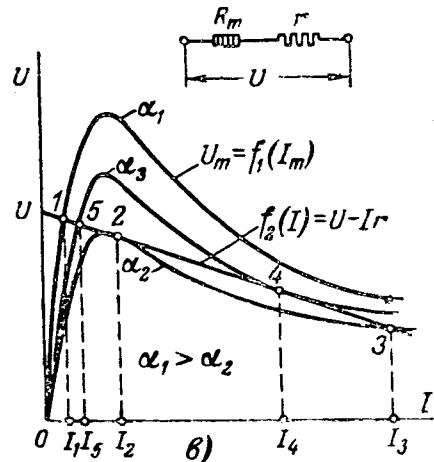
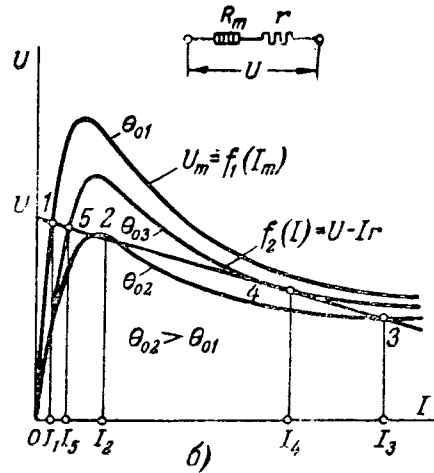
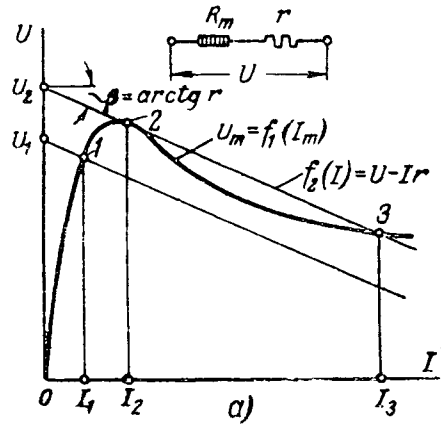
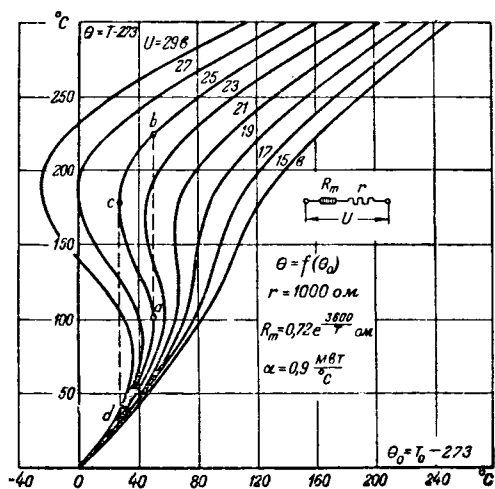


Рис. 3

при некоторой температуре θ_{03} мы получим касание характеристик $U_m = f_1(I_m)$ и $f_2(I) = U - Ir$ в точке 4, после чего последует срыв и режим цепи будет характеризоваться точкой 5.

Третий случай релейного эффекта получается при изменении коэффициента теплоотдачи. Практически это может быть выполнено изменением скорости потока среды или химического



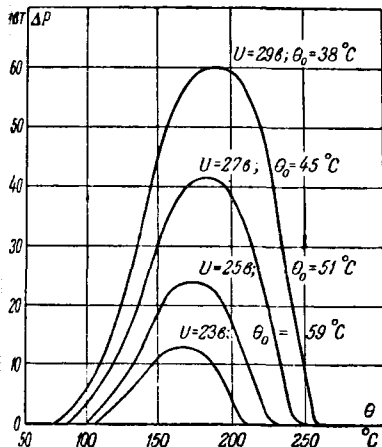


Рис. 5

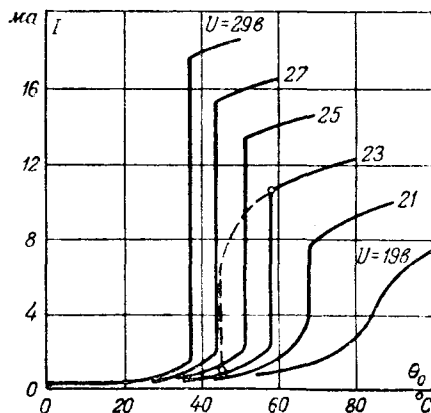


Рис. 6.

падает, и этот процесс кончается тогда, когда состояние термосопротивления определяется точкой *d*. В этом случае имеем обратный скачок тока. Энергетически такой переход определяется тем, что энергия, отдаваемая в окружающую среду, больше энергии, выделяемой в термосопротивлении, т. е.

$$\Delta P = \frac{U^2 R_{\infty} e^{\frac{B}{T}}}{\left(R_{\infty} e^{\frac{B}{T}} + r \right)^2} - \alpha (T - T_0) < 0. \quad (12)$$

На основании (5) и кривых рис. 4 можно строить кривые тока цепи и функции температуры окружающей среды при постоянном напряжении на схеме и в функции напряжения при постоянной температуре среды.

При рассмотрении кривых на рис. 4 видим, релейный эффект пропадает при понижении напряжения до некоторого значения. Это значение является $U=21$ в.

На рис. 6 даны кривые тока цепи, относящиеся к разобранному конкретному случаю. Из рассмотрения их можно заключить, что токи прямого и обратного скачка различны, т. е. кривые токов соответствуют кривым температуры термосопротивления. На основании кривых на рис. 7 представлена зависимость температуры окружающей среды, при которой происходит прямой и обратный скачок тока от напряжения. При повышении температуры прямой скачок происходит при более низком напряжении, чем обратный скачок.

Величина сопротивления r также влияет на величину температуры данной схемы и на величину скачка тока.

Описанное свойство цепи с термосопротивлением может быть положено в основу создания реле, реагирующих на определенную уставку температуры, как, например, температурной сигнализации, тепловой защиты, регулирования температуры.

Примером этому является схема тепловой защиты электродвигателя, разработанная и вы-

полненная автором этой работы. В настоящее время тепловая защита электродвигателей осуществляется косвенным методом, посредством теплового реле. Недостатки этой системы общеизвестны.

Предложенная защита реагирует непосредственно на температуру двигателя. Малые размеры термосопротивления позволяют встроить его в любые узлы защищаемого двигателя, наиболее чувствительные к перегреву. Схема защиты связана с обычным магнитным пускателем.

В цепи пусковой катушки включается магнитный усилитель, имеющий релейную характеристику. Цепь термосопротивления, которое имеет тепловой контакт с защищаемой машиной, питается от обмотки ω_2 , сидящей на магнитопроводе контактора. Таким образом, контактор выполняет функцию трансформатора. Напряжение от обмотки ω_2 выпрямляется селеновым выпрямителем B_2 , который питает цепь термосопротивления и обмотки управления магнитного усилителя.

В изготовленном образце обмотка ω_2 имеет 5 выводов, что позволяет изменять напряжение, подаваемое в цепь термосопротивления и тем самым менять уставку температуры срабатывания схемы.

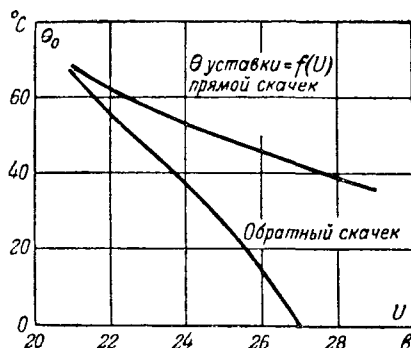


Рис. 7

Схема работает следующим образом.

При нажатии кнопки *П* срабатывает контактор пускателя и двигатель включается в работу. Так как температура его ниже предельной, то

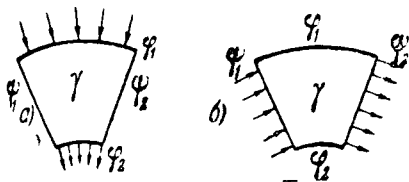


Рис. 1

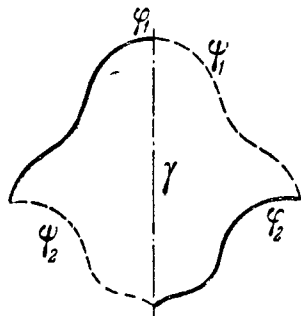


Рис. 2

■ подключении тока к поверхностям φ_1 и φ_2 (а) выражается так:

$$R = \frac{1}{\gamma l} \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1 - \varphi_2}, \quad (1)$$

l — толщина проводника, а γ — его удельная проводимость.

Поменяв в выражении (1) местами функции φ , получим выражение сопротивления при подключении тока к поверхностям φ_1 и φ_2 и совмещении силовых линий с поверхностями φ_1 (рис. 1, б)

$$R' = \frac{1}{\gamma l} \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1 - \varphi_2}. \quad (2)$$

Если граничные условия таковы, что из соображений симметрии можно установить равенство

$$R = R', \quad (3)$$

$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_1 - \varphi_2$ и, следовательно,

$$R = \frac{1}{\gamma l}. \quad (4)$$

Это равенство выполняется во всех случаях, может быть указана такая ось симметрии, граничная линия $\varphi = \text{const}$ справа от оси симметрии является зеркальным изображением $\varphi = \text{const}$ слева от оси симметрии, и нал (рис. 2).

Используя приведенные соображения, можно легко определить величину сопротивления емкости между электродами для некоторых частных, но практически важных, слу-

Пример 1. Ромбическая прямая призма. основанием прямой призмы является ромб (рис. 3, а), то обе пары противоположных граней равны в отношении подведения к ним тока и, следовательно, вне зависимости от величины

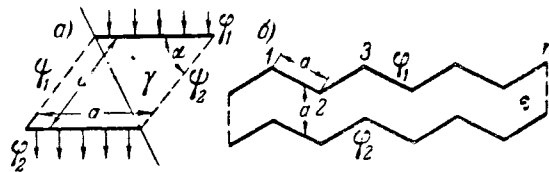


Рис. 3

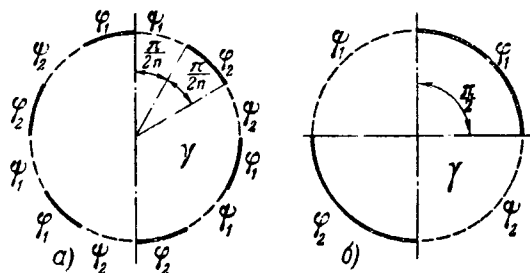


Рис. 4

угла α сопротивление между парой противоположных граней

$$R = \frac{1}{\gamma l},$$

где l — высота призмы.

Полученный результат может быть применен для определения емкости между двумя гофрированными пластинами с расстоянием между ними, равным расстоянию между двумя соседними изломами поверхности (рис. 3, б). В этом случае

$$C = \epsilon \epsilon_0 n l,$$

где n — число изломов поверхности.

Пример 2. Система дугообразных электродов. Если n пар электродов расположены вокруг проводящего цилиндра так, как показано на рис. 4, а, то на поверхности цилиндра чередуются участки линий равного потенциала и силовых линий. Для случая, когда дуга окружности, охватываемая одним электродом, составляет угол $\frac{\pi}{2n}$, длины участков силовых и эквипотенциальных линий по окружности цилиндра совпадают. Так как для этого случая замена φ на ψ и наоборот не приводит к изменению задачи, то

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \psi_1 - \psi_2$$

и, следовательно,

$$R = \frac{1}{\pi \gamma l}$$

Для случая, когда $n = 1$ (рис. 4, б),

$$R = \frac{1}{\gamma l}.$$

Полученный результат точно совпадает с расчетом, произведенным с помощью эллиптических функций (приложение).

Рассмотренное решение представляет интерес для расчета комплексного сопротивления между

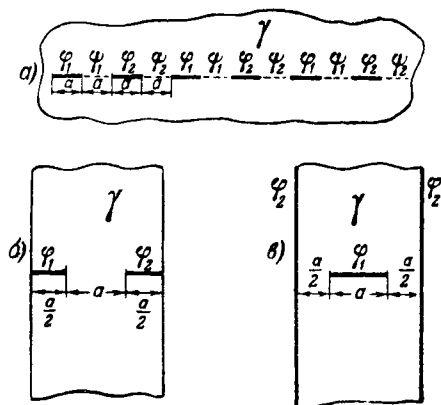


Рис. 5

электродами при высокочастотной сушке леса круглого сечения [Л. 1]. Анизотропия древесины может быть легко учтена подстановкой комплексной величины γ , являющейся средней геометрической величиной проводимостей в радиальном и тангенциальном направлениях [Л. 2].

Пример 3. Система разноименных плоских электродов. Бесконечная решетка, составленная из разноименных ленточных электродов (рис. 5, а), по ширине равных расстоянию между краями разноименных электродов, удовлетворяет условию (3), и следовательно, сопротивление между парой половинок соседних электродов (рис. 5, б)

$$R = \frac{1}{\gamma l}.$$

Этой же величине, деленной на четыре, равно сопротивление между лентой, размещенной, как показано на рис. 5, в, и двумя плоскими бесконечными электродами. Сопоставление результата с расчетом по формуле, полученной путем приближенной замены плоской пластины эквивалентным цилиндрическим электродом [Л. 3], дает расхождение 3% в сторону увеличения сопротивления при расчете по приближенной формуле.

Рассмотренный на рис. 5, а пример очень близок к расстановке электродов при периферийном электропрогреве бетона [Л. 4). Обычно на практике пластинчатые электроды расставляют только с одной стороны полупроводника, а расстояние между ними превышает ширину пластин. Поэтому для расчета сопротивления можно пользоваться заменой пластины равноценным цилиндром и при этом, как следует из рассмотренного примера, погрешность не превышает 3%.

Пример 4. Проводящее кольцо. Для участков проводящего кольца с электродами, изображенными на рис. 6, выполняется условие (3) и, следовательно, справедливо равенство (4) при любых толщинах кольца и углах α . От рис. 6, а, б и в путем зеркальных отображений легко перейти к рис. 6, г, д. Для рис. 6, г

$$R = \frac{1}{2\gamma l},$$

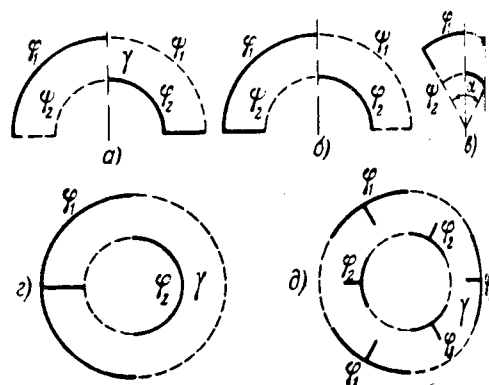


Рис. 6

а для рис. 6, д

$$R = \frac{1}{6\gamma l}.$$

Два последних выражения так же, как и пример 2, могут представить интерес при измерении удельных параметров полупроводящих цилиндров.

Пример 5. Система угольников. Прямая прямоугольная призма с электродами в виде угольников, изображенных на рис. 7, также удовлетворяет условию (3). Отсюда логично предыдущим примерам легко показать, что сопротивление между электродами в конфигурациях, показанных на рис. 7, б и 7, в, может быть подсчитано по формулам

$$R = \frac{1}{4\gamma l}$$

для случая б и

$$R = \frac{1}{n\gamma l},$$

где n — число угольников в ряду, для случая д. Для рис. 7, в $n=4$.

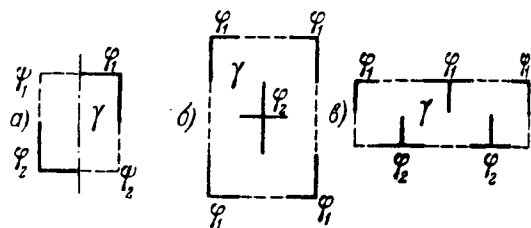


Рис. 7

Пример 6. Система: пластина—угольник. Граничные условия в случае, изображенном на рис. 8, а, удовлетворяют условию (3): замена функции φ на ψ , и наоборот, на границе не меняет существа задачи. Таким образом, здесь как и в предыдущих случаях,

$$R = \frac{1}{\gamma l}.$$

Полученное решение с помощью зеркальных отображений легко применить к задаче, показанной на рис. 8, б.

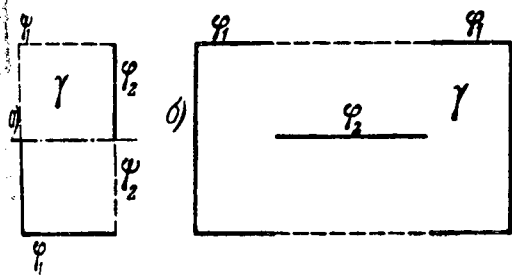


Рис. 8.

В этом случае сопротивление между электродами

$$R = \frac{1}{4\gamma l}.$$

Пример 7. Сопротивление между двумя центрическими многоугольниками. Пусть концентрических многоугольника расположено так, что напротив вершин углов внешнего многоугольника располагаются центры сторон внутреннего многоугольника, а расстояние между этими точками равно половине стороны внешнего многоугольника (рис. 9, а). В таком случае полость, заключенная между двумя многоугольниками, может быть разбита на $2n$ симметричных четырехугольных элементов, каждый из которых имеет по две равные стороны a и b . Каждого из таких элементов выполняется условие (3) и, следовательно, его сопротивление может быть выражено по формуле (4). Общее сопротивление пустотелого многогранника, полученного на двух таких многоугольниках, представляет собой параллельное соединение сопротивлений $2n$ отдельных элементов и равно

$$R = \frac{1}{2n\gamma l},$$

где n — число углов многоугольников. Для $n=4$ (рис. 9, б), то

$$R = \frac{1}{8\gamma l}.$$

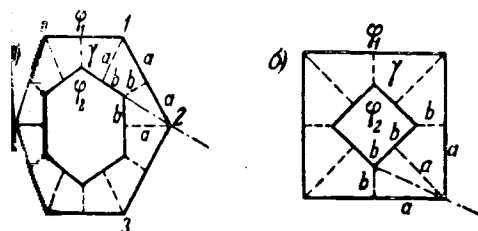


Рис. 9.

Пример 8. Внешнее сопротивление квадрата. Пусть сопротивление между двумя электродами, совпадающими с противоположными сторонами квадратного сечения, выполненного из диэлектрика и погруженного в полупроводник с удельной проводимостью γ (рис. 10). Внешнее пространство, граничащее со сечением (при исключении краевого эффекта на электродах), обладает такой же симметрией, как и при выводе формулы (4) и, следовательно, сопротивление между электродами может быть рассчитано по этой формуле.

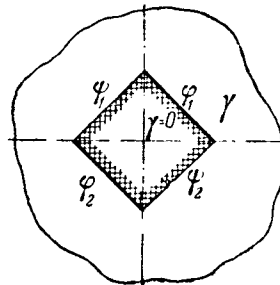


Рис. 10.

Аналогично может быть определено внешнее сопротивление между электродами, если стержень имеет форму кругового цилиндра (например, рис. 4). Приведенный пример может представлять интерес при непосредственном измерении удельных сопротивлений пластичных и жидких полупроводящих масс.

Выводы. Рассмотренные примеры показывают, что из одного условия симметрии функций φ и ψ в плоскопараллельном поле могут быть предельно просто и совершенно точно определены сопротивления между пластинчатыми электродами для ряда частных случаев.

Полученные результаты могут быть также применены для оценки точности решения более общих задач приближенными методами.

Приложение. Как известно [Л. 5], электрическое поле, создаваемое двумя разноименными плоскими пластинами (рис. 11, а), может быть выражено следующим уравнением:

$$Z = x_1 \operatorname{sn} \left(\frac{2Kw}{U} \right); \quad (\text{П}, 1)$$

здесь $w = \varphi + j\psi$ — комплексный потенциал точки; Z — ее комплексная координата; K — полный эллиптический интеграл первого рода $K = K(k)$; $k = \frac{x_1}{x_2}$ — модуль эллип-

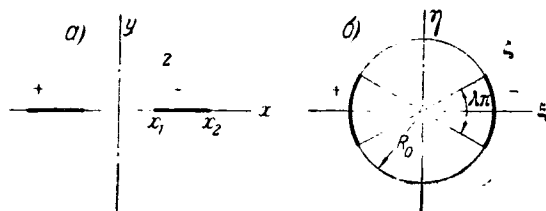


Рис. 11

тического синуса; U — разность потенциалов между пластинами.

В таком случае сопротивление между пластинами может быть выражено так:

$$R = \frac{1}{\gamma l} \frac{K(k)}{K(\sqrt{1-k^2})}. \quad (\text{П}, 2)$$

Если теперь произвести дробнолинейное конформное преобразование вида

$$\xi = A \frac{Z+B}{Z+C} \quad (\text{П}, 3)$$

и величины A , B и C выбрать так, чтобы верхняя полу-плоскость Z отобразилась на круг радиуса R_0 с центром в начале координат (рис. 11,б), то сопротивление между электродами в плоскости ζ будет равно сопротивлению между электродами в верхней полуплоскости Z , т. е. будет равно двойному сопротивлению (П,2)

$$R = \frac{1}{\gamma l} \frac{2K(k)}{K(\sqrt{1-k^2})}. \quad (\text{П,4})$$

Если дуга окружности, охватываемая одним электродом, равна $\lambda\pi$, то, определив постоянные преобразования A , B и C в (П,3) из условий

$$\zeta(0,0) = -jR_0, \quad \zeta(x_1, 0) = R_0 e^{-j\lambda\pi},$$

$$\zeta(x_2, 0) = R_0 e^{j\lambda\pi} \quad \text{и} \quad \zeta(\infty) = jR_0,$$

легко получить, что

$$k = \operatorname{tg}^2 \frac{(1-\lambda)\pi}{4}. \quad (\text{П,5})$$

В случае, когда $\lambda = 0,5$, получаем:

$$k = \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{8} = 0,171$$

и, следовательно,

$$R = \frac{1}{\gamma l} \frac{2K(0,171)}{K(0,9707)} = \frac{1}{\gamma l} \frac{2 \cdot 1,5825}{3,165} = \frac{1}{\gamma l},$$

т. е. результаты, полученные при расчете по формуле (П,4), в точности совпадают.

Литература

1. А. Н. Беликов. Электросушка массивной древесины, Лесная промышленность, № 7 — 8, 1941.
2. А. В. Нетушил. Электрические поля в тропных средах, Электричество, № 3, 1950.
3. А. В. Нетушил, К. Б. Исаев и С. К. Фролов. Применение системы формул Максвелла для расчета сопротивлений между электродами при электропробитии бетона, Электричество, № 6, 1949.
4. Инструкция по применению электропробития в строительстве, Наркомстрой, 1945.
5. Л. И. Балабуха. Математический расчет полей электростатики, Теоретическая и экспериментальная электротехника, № 1—2, 1932.

125.2.1



Влияние частоты переменного тока на электрические и световые параметры люминесцентных ламп

Инженер М. С. КАПНИК

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Исследование было проведено для частот до 1 000 гц. Определялись величины светового потока F , мощности P , тока I и напряжения U .

Измерение световых потоков производилось в шаровом фотометре селеновым фотоэлементом с компенсационным фильтром. Измерялась средняя величина светового потока, изменяющегося во времени. Выбор электроизмерительных приборов производился с учетом независимости их показаний от частоты питающего тока и от формы кривых тока и напряжения [Л. 1, 2].

Определение эффективных значений тока и напряжения при учете указанных условий не вызывает особых затруднений и обеспечивается применением термоэлектрического амперметра и электростатического вольтметра.

Трудности применения обычного квадрантного электрометра и термоэлектрического ваттметра [Л. 3] заставили производить измерение мощности ламп при повышенных частотах с помощью специального теплового ваттметра. Омическое сопротивление, входящее в схему ваттметра и шунтирующее люминесцентную лампу, было выбрано величиной порядка 5 000 ом. Это было сделано с целью уменьшить влияние этого сопротивления на формы кривых напряжения, приложенного к лампе, и тока, проходящего через нее.

Показано, что при повышении частоты переменного тока световая отдача люминесцентной лампы возрастает; дано краткое объяснение этого явления.

Характер осциллограмм напряжений и тока показан на рис. 1.

В результате испытания пяти люминесцентных ламп производств ВЭИ было установлено, что их световая отдача при переходе от частоты 50 гц к частоте 1 000 гц в среднем возрастает на 17%. Это можно объяснить тем, что при частоте 1 000 гц интенсивное послесвечение люминофора не успевает так значительно уменьшиться в промежутке между двумя периодами горения, как при 50 гц. Кроме того при работе на повышенных частотах увеличивается продолжительность горения лампы в течение

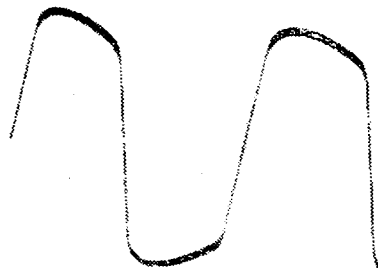
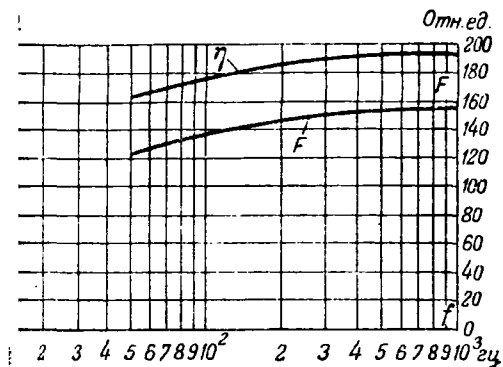


Рис. 1. Характерный вид осциллограмм напряжения сети, напряжения на лампе и тока, проходящего через лампу при частотах 400—1 000 гц. (балласт-омическое сопротивление)



Зависимость светового потока люминесцентных ламп от частоты переменного тока.

кого периода. В этом можно убедиться, зная формы кривых тока и напряжения в случаях [Л. 1].

Таблице и на рис. 2 приведены данные од- з измеренных ламп при разных частотах шего напряжения.

| Частота питающего тока, гц | Напряжение на лампе, в | Ток через лампу, а | Потребляемая мощность, вт | Световой поток F в относительных единицах | Световая отдача γ в относительных единицах |
|----------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------|---|--|
| 50 | 60 | 0,3 | 15,1 | 121 | 8,04 |
| 400 | 52 | 0,3 | 15,8 | 149 | 9,44 |
| 800 | 52 | 0,3 | 15,5 | 149 | 9,65 |
| 1000 | 52 | 0,3 | 15,4 | 150 | 9,73 |

Литература

1. В. А. Фабрикант. УФН, т. 27, вып. 2, 1945.
2. Р. Г. Извеков. Основные соотношения для контура газосветной лампы, Электричество, № 9, 1940.
3. П. П. Храмов. Термоэлектрический ваттметр, Электричество, № 12, 1940.

[10. 7. 1950]



Измерение взаимной индуктивности при частоте 50 гц

Инженер А. И. ФЮРСТЕНБЕРГ

Москва

шки взаимной индуктивности на 0,01 гн, часто применяемые электрических и

ых измерений, могут быть измерены при 50 гц без использования образцовых мер индуктивности или взаимной индуктивности. Этот метод, являясь упрощением ранее описанной схемы, может быть легко осуществлен на практике [Л. 1].

Изображенной на рис. 1 схеме э. д. с. взаимной индуктивности, сравнивается с падением напряжения на известном активном сопротивлении. Если стрелка индикатора, имеющего очень большое сопротивление, отклоняется на углы в обоих положениях переключателя справедливо очевидное соотношение

$$I\omega M_x = IR_0,$$

$$M_x = \frac{R_0}{\omega}; \quad (1)$$

ируемая взаимная индуктивность, гн;
разцовое активное сопротивление, ом;
овая частота колебаний сети, сек.

Излагается простой метод измерения взаимной индуктивности по известным активному сопротивлению и частоте сети.

Для плавности изменения R_0 и уменьшения погрешности, связанной с непостоянством переходных сопротивлений контактов переключателей, R_0 составляется из постоянного сопротивления (бифилярная намотка) на 3,5—4 ом, параллельно которому включается магазин сопротивления.

При частоте 50 гц можно пренебречь влиянием емкости индикатора [Л. 2]. Индикатор с квадратичной характеристикой в меньшей сте-

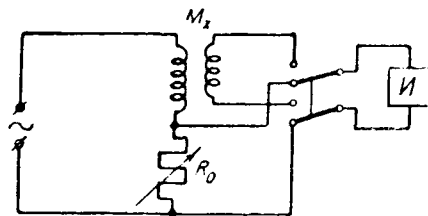


Рис. 1.

пени подвержен влиянию гармоник напряжения сети нежели приборы, показания которых пропорциональны амплитудному или среднему значению напряжения.

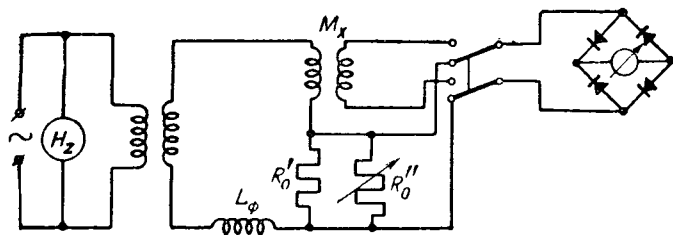


Рис. 2.

При применении квадратичного индикатора погрешность измерения, вызванная гармониками, составляет

$$\Delta_z = + \left[\sqrt{\frac{1 + 4 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 + 9 \left(\frac{I_3}{I_1} \right)^2 + \dots}{1 + \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 + \left(\frac{I_3}{I_1} \right)^2 + \dots}} - 1 \right] 100\%, \quad (2)$$

здесь: Δ_z — погрешность измерения, обусловленная гармониками в процентах; I_1 — амплитуда тока основной частоты, проходящего через катушку, а; I_2, I_3 — амплитуды токов соответствующих гармоник, а.

С целью уменьшить рассматриваемую погрешность, последовательно с объектом измерения можно включить индуктивность, не содержащую стального сердечника (рис. 2). Индуктивное сопротивление фильтровой катушки при частоте 50 гц должно быть в 1,2—1,5 раза больше ее активного сопротивления. В этом случае можно приближенно считать, что нечетные гармоники, имеющие место в сетях переменного тока, будут ослаблены в число раз, равное порядковому номеру гармоники.

Оценим порядок величины погрешности, которая может возникнуть при значительном проценте гармоник. Положим, что в худшем случае $\frac{U_3}{U_1} = 0,09$ и $\frac{U_5}{U_1} = 0,05$; тогда $\frac{I_3}{I_1} = 0,03$ и $\frac{I_5}{I_1} = 0,01$. Подсчет по формуле (2) дает $\Delta_z \approx +0,5\%$. Так как величина Δ_z лежит в пределах $0 \div +0,5\%$, можно ввести поправочный коэффициент $K = 1,0025$, на который умножается частота сети. Тогда погрешность сводится к величине $\delta_z = \pm 0,25\%$.

Для уменьшения погрешности измерения, обусловленной гармониками, можно воспользоваться катодным осциллографом, включаемым до фильтровой катушки. Если, как это бывает в подавляющем большинстве случаев, форма кривой напряжения незначительно искажена (отклонения

ординат от чистой синусоиды не превышает 5% амплитуды) можно считать, что δ_z составляет примерно $\pm 0,1\%$. При наличии существенных искажений следует, сняв осциллограмму, вычислить содержание отдельных гармоник напряжения [Л. 3]. Затем, в соответствии с указанным, определяются гармоники тока, идущего через катушку, и далее вычисляется поправочный коэффициент согласно (2).

При наличии четных гармоник (питание от лампового генератора) возникает дополнительная погрешность, на чем мы здесь не останавливаемся.

Наиболее подходящим индикатором является стрелочный гальванометр или микроамперметр на 5—20 мкА, включенный через двухполупериодный выпрямитель. При использовании прибора типа Ф (чувствительность: $1^\circ = 0,2$ мкА) и измеряемых отечественной промышленностью высокочастотных медно-закисных выпрямителей отклонение стрелки прибора на 25 делений шкалы имеет место при напряжении 0,3 в. Характер шкалы близок к квадратичному. Сопротивление индикатора при указанном напряжении равно примерно 70 кОм и может не учитываться.

Питание измерительной схемы следует осуществлять от трансформатора, вторичная обмотка которого дает 4—6 в. Регулировка напряжения в первичной и вторичной цепях трансформатора реостатами увеличивает влияние гармоник. Выбор требуемого напряжения осуществляется комбинацией чисел витков трансформатора.

Для измерения частоты колебаний сети можно применять стрелочный частотомер.

Для уменьшения погрешности, связанной с колебаниями напряжения сети, следует использовать среднее арифметическое из результатов 4 уравниваний схемы.

При использовании стрелочного частотомера класса 0,2, фильтровой катушки и осциллографического аналитического определение вероятной погрешности измерения дает $\Delta = \pm 0,25\%$.

Результат измерения образцовой взаимной индуктивности на 0,01 гн, полученный описанным методом, совпал с показанием точного метода в пределах 0,2%.

Литература

1. J. Dowling. Нешутирующий ламповый индикатор. Philosophical Magazin, т. 25, № 166, 1938.
2. В. Базилевич. Электрические измерения и приборы. КУБУЧ, стр. 378, 1935.
3. К. А. Круг. Основы электротехники. Госэнергоиздат, т. 2, стр. 242, 1946.



Простой способ численного решения алгебраических уравнений

Доктор техн. наук, проф. Д. А. ГОРОДСКИЙ

Москва

При анализе систем уравнений бывает полезно, хотя бы приближенно, но, по возможности, быстро оценить значения корней алгебраического уравнения. Указываемые в приеме дают возможность сравнительно легко решить эту задачу.

1. Приближенное решение. Дано уравнение:

$$p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0. \quad (1)$$

Положим:

$$a_1 p^{n-1} + \dots + a_n p^{n-k} + \dots + a_n = f(p), \quad (2)$$

Положим все точки плоскости комплексного переменного p на плоскости $f(p)$. Те из них, которые лежат в нуле, и будут корнями данного уравнения. Необходимую для этого вычислительную функцию можно значительно упростить, если параметризовать ее должным образом. Для этого нужно только выбирать точки p не случайно, а по окружностям: $|p| = \text{const}$, фиксируя в них, которые расположены под углами 0° и т. п. (при желании их можно брать, чаще, и чаще). Для этих точек числовые коэффициенты выражения (2) постоянны и при переходе от точки к точке меняются лишь их значения $(n-k)(0 \div 30 \div 60 \text{ и т. д.})$ градусов. Это позволяет построить на плоскости $f(p)$, пользуясь углом с углами $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Получается своего рода многозвенный механизм, отдельные звенья которого вращаются со все большей угловой скоростью.

Таким образом, любая выбранная на плоскости $f(p)$ кривая (рис. 1) превращается на плоскости p в некоторую кривую (рис. 2).

Зная p , легко отыскать такое его значение, при котором кривая (рис. 2) пройдет через начало координат или по крайней мере вблизи. Отметка на кривой (рис. 2) покажет при

Приводится графический способ отыскания корней алгебраического уравнения любой степени с последующим аналитическим уточнением их значений.

этом, где на окружности лежит то значение p , которое является корнем данного уравнения.

Например, из рис. 2 видно, что при несколько большем p кривая пройдет через начало координат между отметками „90“ и „120“. Следовательно, один из корней расположен так, как указано крестиком (в кружочке) на рис. 1. Этому корню соответствует, очевидно и второй — сопряженный.

Так могут быть определены приближенные значения всех корней уравнения.

2. Уточнение решения. Действительные корни уточняем, пользуясь схемой Горнера. Что касается комплексных корней, то поступаем следующим образом. Зная приближенное значение двух корней, составляем произведение

$$(p - p_1)(p - p_2) = p^2 + ap + b \quad (3)$$

и делим на него левую часть заданного уравнения. Получаем в остатке $mp + n$. После этого даем коэффициенту a приращение Δ_1 и снова делим тот же многочлен на $p^2 + (a + \Delta_1)p + b$. Получаем в остатке $m_1 p + n_1$. Наконец, даем коэффициенту b приращение Δ_2 и делим тот же многочлен на $p^2 + ap + b + \Delta_2$. Получаем в остатке $m_2 p + n_2$.

Вычисляем после этого относительные приращения остатков:

$$\begin{aligned} \Delta m_1 &= \frac{m_1 - m}{\Delta_1}; & \Delta n_1 &= \frac{n_1 - n}{\Delta_1}; \\ \Delta m_2 &= \frac{m_2 - m}{\Delta_2}; & \Delta n_2 &= \frac{n_2 - n}{\Delta_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Это дает возможность составить уравнения для определения таких приращений коэффици-

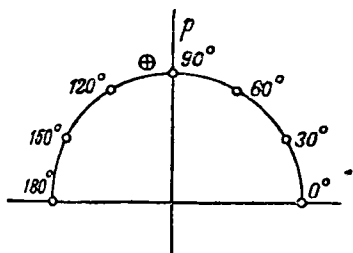


Рис. 1.

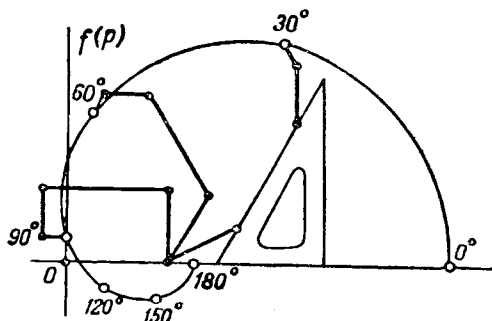


Рис. 2.

ентов a и b (т. е. для приращений Δa и Δb), которые превратили бы остатки m и n в нуль, а именно:

$$\left. \begin{aligned} \Delta m_1 \cdot \Delta a + \Delta m_2 \cdot \Delta b &= -m, \\ \Delta n_1 \cdot \Delta a + \Delta n_2 \cdot \Delta b &= -n, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

откуда и находим Δa и Δb .

Для дальнейших уточнений иногда можно не повторять заново всех вычислений, но пользоваться приближенно прежними значениями относительных приращений: Δm_1 ; Δn_1 ; Δm_2 ; Δn_2 и переходить сразу к уравнениям (5), подставляя в них вместо m и n новые, более точные значения.

Пример. Дано уравнение:

$$p^4 + 2p^3 + 5p^2 + 3p - 4 = 0.$$

Полагая $p=1$, строим кривую, приведенную на рис. 2. Участок ее, между отметками 90° и 120° , проходит недалеко от начала координат. Поэтому, даже не строя новой кривой, можно заключить, что первый корень будет расположен приблизительно так, как указано на рис. 1. Отсюда получаем:

$$p_{1,2} \approx -0,2 \pm j1,1.$$

Уточним это решение. Составляем произведение:

$$(p - p_1)(p - p_2) = p^2 + 0,4p + 1,25 \quad (6)$$

и делим на него левую часть заданного уравнения. В остатке получаем: $-0,244p + 0,112$. Следовательно,

$$m = -0,244; \quad n = 0,112.$$

Даем затем коэффициенту a приращение $\Delta_1 = 0,01$, т. е. берем выражение: $p^2 + 0,41p + 1,25$ и делим на него левую часть заданного уравнения. Остаток дает нам:

$$m_1 = -0,258; \quad n_1 = 0,127.$$

Таким же точно образом даем приращение коэффициенту b : $\Delta_2 = 0,01$, т. е. берем выражение: $p^2 + 0,4p + 1,26$ и делим на него левую

часть заданного уравнения. Остаток дает

$$m_2 = -0,256; \quad n_2 = 0,094.$$

Вычисляем относительные приращения ков:

$$\Delta m_1 = \frac{m_1 - m}{\Delta_1} = -1,4; \quad \Delta n_1 = \frac{n_1 - n}{\Delta_1} = 1,5;$$

$$\Delta m_2 = \frac{m_2 - m}{\Delta_2} = -1,2; \quad \Delta n_2 = \frac{n_2 - n}{\Delta_2} = -1,8$$

и составляем уравнения:

$$-1,4 \cdot \Delta a - 1,2 \cdot \Delta b = 0,244,$$

$$1,5 \Delta a - 1,8 \Delta b = -0,112,$$

откуда

$$\Delta a = -0,133; \quad \Delta b = -0,049.$$

Таким образом, вместо выражения (6) дует взять более точное:

$$p^2 + 0,267p + 1,201.$$

И действительно, поделив на него левую часть заданного уравнения, получаем уже не остатки:

$$m' = 0,028; \quad n' = -0,007.$$

Подставив эти значения в правые части уравнений (5), получаем поправки:

$$\Delta a' = 0,014; \quad \Delta b' = 0,008.$$

Следовательно, вместо (8) надо взять точное выражение:

$$p^2 + 0,281p + 1,209.$$

После нескольких таких поправок окончательно:

$$p^2 + 0,278p + 1,207,$$

а после деления на него левой части заданного уравнения получаем

$$p^2 + 1,722p + 3,314.$$

Таким образом, корни заданного уравнения будут:

$$p_{1,2} = -0,139 \pm j1,090,$$

$$p_{3,4} = -0,861 \pm j1,604.$$

Степень уравнения не ограничивает области применения этого метода.



Металлические распределительные устройства 6—10 кВ для наружной установки

Инж. Я. А. ИРЛАХМАН, инж. Ф. П. ЛЕВИН

Сибэлектромонтаж МСПТИ

До настоящего времени в практике строительства отсутствовали комплектные многолинейные цельнометаллические распределительные устройства. Сооруженные в некоторых городах Сибири по чертежам Сибэлектромонтажа небольшие цельнометаллические трансформаторные киоски

Описываются закрытые металлические распределительные устройства 6-10 кВ, составленные из крупных узлов, предварительно собранных в мастерских или на заводе.

и пункты показали удовлетворительную работу в течение года: не наблюдалось

отпотевания стен, не было отказа в работе счетчиков, а также не было аварий и повреждений оборудования из-за того, что подстанции были цельнометаллические, а не кирпичные.

ое распределитель-
тройство, рассчитан-
пропускную спо-
ть до 20 000 кВА,
самостоятельной
ской. Оно может
наиваться к любому
ому или вспомога-
му помещению, рас-
на любое количе-
абин и выполняется
вариантах.

первому варианту,
нному на рис. 1,
делительное уст-
о комплектуется из
ртных металличе-
амер и имеет то же
уктивное располо-
аппаратуры и те же
ты, что и металли-
сборные камеры,
банные в системе

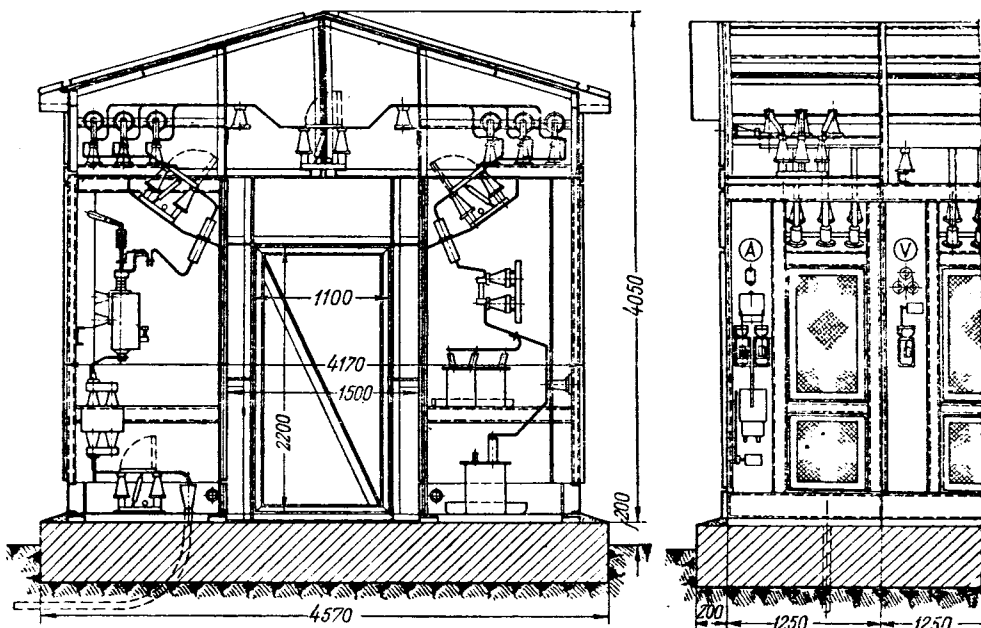
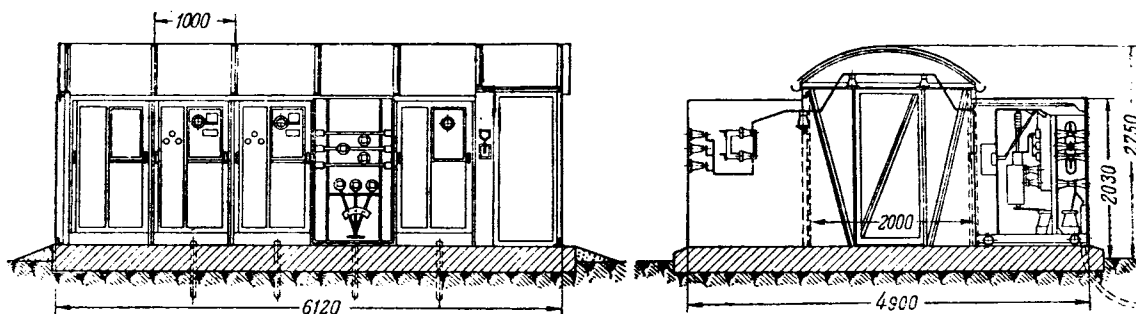


Рис. 1. Металлическое распределительное устройство 6—10 кВ из сборных камер.

Металличе-
аспреди-
устрой-
10 кВ из
выдвижны-
аками и
ным при-
нем к
шнам.



электромонтажа для изготовления в цент-
мастерских.

ная стенка, торцевые части распредели-
о устройства и крыша обшиваются сталь-
стами. Кирпичные стены отсутствуют.
второму варианту, показанному на рис. 2,
делительное устройство комплектуется из
выдвижными шкафами и штепсельными
риями со сборными шинами, что позво-
ществлять быструю смену электрообору-
Конструкция является сравнительно
отом 1 более компактной, требует меньше
и является более удобной при эксплоа-
В обоих вариантах распределительных
в в камерах могут быть смонтированы
ители типов ВМГ-133 или ВГ-10, транс-
ры напряжения, разрядники и пр. Кон-
допускают секционирование сборных
ключателем или разъединителем.

ные металлические камеры (шкафы) из-
ются комплектно со всеми аппаратами, при-
и вспомогательными устройствами в мон-
мастерских или на электромеханических
Измерительные приборы и реле могут
становлены на фасаде камер, специальных
или вынесены в щитовые помещения.
встроенном виде, с отрегулированной и
ной аппаратурой, камеры и все строитель-

ные детали перевозятся на место и устанавлива-
ются на подготовленных фундаментах или бетон-
ных плитах.

Поддерживающие и строительные конструк-
ции распределительных устройств состоят из от-
дельных узлов и блоков сборного типа, заготов-
ляемых также в мастерских или на заводе.

Выводы. Целнометаллические распреде-
лительные устройства и подстанции по сравнению
с такими же устройствами, но с кирпичными
стенками имеют ряд преимуществ:

1) не требуют разнообразного и большого ко-
личества строительных материалов и рабочей
силы разных специальностей;

2) позволяют изготавливать распределительные
устройства полностью заводским путем, осущест-
влять скоростные и индустриальные методы про-
изводства строительного-монтажных работ;

3) способствуют быстрейшему вводу в экс-
плуатацию электротехнических устройств;

4) дают возможность заготовить блоки и узлы
распределительного устройства заблаговременно,
независимо от готовности строительной части;

5) в необходимых случаях позволяют менять
место расположения распределительного устрой-
ства на территории предприятия без крупных
дополнительных затрат.

[15.9.1950]

Проект ГОСТ „Аппараты электрические высокого напряжения. Классификация и терминология“

Инженеры Г. Б. ХОЛЯВСКИЙ, Л. К. ГРЕЙНЕР, К. Е. БУЛГАКОВ

Завод „Электроаппарат“

Обращение редакции к читателям по поводу настоящего проекта ГОСТ, а также начало проекта и вступительная статья к проекту ГОСТ «Аппараты электрические высокого напряжения. Классификация и терминология» напечатаны в № 1 журнала, стр. 67.

Б. Основные элементы а. в. н.

3. Элементы изоляции а. в. н.

121. *Ввод*. Проходной изолятор бакового а. в. н.
122. *Штанга (изоляционная тяга)*. Изоляционная деталь, приводящая в движение траверсу (п. 63) коммутационного а. в. н.
123. *Покрышка аппарата или изолятора*. Керамическая деталь, защищающая изоляцию органического происхождения от атмосферных воздействий и от непосредственных разрядов по ней.
124. *Междуполосная перегородка*. Изоляционная перегородка между полюсами а. в. н. для уменьшения возможности разряда между ними.
125. *Экран (электростатический)*. Металлическая (или металлизированная) деталь, предназначенная для улучшения внешнего электростатического поля а. в. н. или его частей.
126. *Барьер*. Изоляционная деталь, препятствующая разряду между частями разного потенциала а. в. н. и располагаемая обычно ближе к электроду с более неравномерным полем.
127. *Обшивка*. Изоляция поверхности металлических баков, перегородок и т. п.
128. *Выравнивающие электроды (обкладки)*. Металлические детали (обкладки) специальной формы и размеров, предназначенные для улучшения внутреннего электростатического поля а. в. н. или его частей.
129. *Защитные электроды (защитная арматура)*. Металлические детали (рога, кольца и т. п.), служащие для отведения разряда от поверхности изоляции а. в. н.

4. Приводные механизмы, их основные элементы и вспомогательная аппаратура а. в. н.

130. *Привод*. Отдельный или встроенный в а. в. н. механизм, служащий для производства аппаратом коммутационных операций.
131. *Ручной привод*. Привод (п. 130), предназначенный для управления коммутационным а. в. н. вручную (за счет мускульной силы оператора).
132. *Силовой привод (двигательный привод)*. Привод, рассчитанный на управление коммутационным а. в. н. от постороннего источника или предварительно создаваемого запаса энергии (не от мускульной силы оператора).
133. *Электрический привод*. Силовой привод (п. 132), рассчитанный на управление а. в. н. от источника электрической энергии.
134. *Пневматический привод (воздушный привод)*. Силовой привод, рассчитанный на управление а. в. н. посредством сжатого воздуха.

135. *Грузовой привод*. Силовой привод, рассчитанный на управление а. в. н. за счет энергии падающего груза.

136. *Пружинный привод*. Силовой привод, рассчитанный на управление а. в. н. за счет энергии предварительно заведенных пружин.

137. *Инерционный привод*. Силовой привод, рассчитанный на управление а. в. н. за счет энергии при движении маховых масс.

138. *Пиропровод, привод с взрывным зарядом*. Силовой привод, рассчитанный на управление а. в. н. энергией, выделяемой при горении взрывчатого вещества.

139. *Электромагнитный привод*. Электрический (п. 138), производящий включение а. в. н. за счет энергии электромагнита.

140. *Электродвигательный привод*. Электрический привод, производящий управление а. в. н. посредством электродвигателя.

141. *Ручной привод с автоматическим отключением*. Ручной привод (п. 131) с устройством для автоматического отключения а. в. н.

142. *Ручной привод без автоматического отключения*. Ручной привод без устройства для автоматического отключения а. в. н.

143. *Рычажный привод*. Ручной привод, в котором оператор прилагает усилие к рукоятке или рычагу.

144. *Маховичный привод*. Ручной привод, в котором оператор прилагает усилие к маховику.

145. *Свободное расцепление*. Устройство в а. в. н., позволяющее подвижным частям аппарата отключаться с частями приводного механизма, связанным с частями аппарата, с помощью элементов привода (например, рукояткой или маховиком).

146. *Встроенное реле*. Встроенное в коммутационный а. в. н. первичное или вторичное реле, воздействующее на устройство автоматического отключения аппарата при изменении режима.

147. *Электромагнит отключения*. Встроенный в а. в. н. электромагнит, воздействующий на отключение аппарата по команде реле или оператора.

148. *Встроенное реле максимального тока*. Встроенное реле (п. 126), действующее при превышении током в первичной цепи коммутационного а. в. н. заданной величины.

149. *Встроенное реле минимального напряжения*. Встроенное реле, действующее при падении напряжения в первичной цепи коммутационного а. в. н. ниже заданной величины.

150. *Выдержка времени*. а) Устройство, добавляемое к встроенному реле (максимального тока или минимального напряжения) для обеспечения некоторого промежутка времени между началом действия встроенного реле и моментом его воздействия на отключение а. в. н. б) Промежуток времени между началом действия реле и моментом его воздействия на отключение а. в. н.

151. *Электромагнит включения*. Электромагнит, производящий включение коммутационного а. в. н. в электромагнитном приводе или освобождающий механизм включения в приводах других типов.

152. **Якорь (электромагнита).** Подвижная ферромагнитная часть электромагнита, производящая механическую работу.
153. **Ярмо (электромагнита).** Неподвижная часть магнитной цепи электромагнита.
154. **Контрольный полюс (электромагнита); стоп.** Выступающая часть ярма электромагнита, к которой притягивается якорь.
155. **Защелка (включения).** Устройство (механизм) удерживания а. в. н. во включенном положении.
156. **Контактор.** Электромагнитный коммутационный аппарат низкого напряжения, включающий цепь включения электрического привода.
157. **Ключ управления.** Аппарат низкого напряжения, выполняющий команды на включение и отключение а. в. н.
158. **Контактный ряд (зажимный ряд).** Набор однотипных контактов для присоединения контрольной проводки к аппарату управления а. в. н.
159. **Блокзамок.** Устройство (механическое или электрическое), обеспечивающее защиту от неправильности коммутационных операций.
160. **Блокконтакты.** Вспомогательные контакты, сбрасываемые с а. в. н., размыкающиеся или замыкающиеся при изменении коммутационного положения а. в. н. и служащие для целей сигнализации или блокировки.

Общие величины и основные характеристики, относящиеся к а. в. н.

1. Общие термины

161. **Номинальные данные а. в. н.** Данные, гарантированные изготовителем для работы а. в. н. при номинальном режиме работы.
162. **Данные испытания а. в. н.** Данные, полученные в результате испытания отдельного аппарата или группы аппаратов определенного типа.
163. **Номинальный режим работы.** См. п. 152 ГОСТ 2774-44.
164. **Продолжительный режим работы.** См. п. 154 ГОСТ 2774-44.
165. **Кратковременный режим работы.** См. п. 156 ГОСТ 2774-44.
166. **Повторно-кратковременный режим работы.** См. п. 157 ГОСТ 2774-44.
167. **Относительная продолжительность включения.** См. п. 158 ГОСТ 2774-44.
168. **Характеристики изоляции а. в. н.** Номинальные данные и данные испытания а. в. н., определяющие его надежность по отношению к воздействиям напряжения промышленной частоты и импульсов напряжения.
169. **Характеристики нагрева а. в. н. при длительной работе.** Номинальные данные и данные испытания а. в. н., определяющие его работу в тепловом отношении при длительном, кратковременном и повторно-кратковременном режиме (при которых необходимо учитывать влияние охлаждения).
170. **Характеристики устойчивости а. в. н. при сквозных коротких замыканиях.** Номинальные данные и данные испытания, определяющие работу а. в. н., предназначенных для последовательного включения в цепь высокого напряжения, при прохождении через них токов короткого замыкания, причем для коммутационных аппаратов — полностью включенном положении.
171. **Характеристики отключающей и включающей способности коммутационного а. в. н. (коммутационной способности а. в. н.).** Номинальные данные и данные испытания коммутационного а. в. н. в отношении его способности включать и включать цепь тока высокого напряжения в определенных циклах и в предписанных нормах.

1. **Номинальный ток а. в. н.** Наибольший стандартный ток для работы при котором предназначен аппарат.

3. **Номинальное напряжение а. в. н.** Наибольшее из линейных напряжений, для работы при котором предназначен аппарат.

174. **Наибольшее рабочее напряжение а. в. н.** Наибольшее напряжение, при котором допустима неограниченно-длительная работа а. в. н.

175. **Оперативное отключение или включение а. в. н.** Отключение или включение коммутационного а. в. н. при наличии высокого напряжения на его зажимах.

176. **Неоперативное отключение или включение а. в. н.** Отключение или включение коммутационного а. в. н. при отсутствии высокого напряжения на его зажимах.

177. **Автоматическое повторное включение а. в. н. (АПВ).** Режим работы коммутационного а. в. н., при котором аппарат после автоматического отключения автоматически включается в цепь — мгновенно или с уставкой на определенный интервал.

178. **Цикл АПВ.** Режим автоматического повторного включения, определяемый числом единичных операций АПВ и интервалами (в секундах) между ними. Пример обозначения цикла АПВ: $O-o-BO-t_1-BO-t_2-BO$, где BO — единичная операция, т. е. включение на ток короткого замыкания с последующим мгновенным отключением.

179. **Длительность (время) мгновенного АПВ.** Время от подачи команды на отключение а. в. н. до замыкания цепи при АПВ (время перерыва тока в цепи).

180. **Полупольное (пофазное) включение.** Режим работы коммутационного а. в. н., при котором возможно оперативное отключение и включение отдельных полюсов аппарата.

2. Характеристики изоляции а. в. н.

181. **Испытательное напряжение промышленной частоты.** Напряжение промышленной частоты, предписанное стандартами для данного номинального напряжения, приложенное которого (в течение одной или 5 мин.) а. в. н. должен выдерживать при выпуске его поставщиком.

182. **Сухоразрядное напряжение.** Наименьшее напряжение промышленной частоты, при котором происходит разряд на воздушной изоляции а. в. н. при нормальных атмосферных условиях.

183. **Мокроразрядное напряжение.** Наименьшее напряжение промышленной частоты, при котором на воздушной изоляции а. в. н. происходит разряд при стандартных условиях искусственного дождя.

184. **Импульсное испытательное напряжение.** Предписанная нормами амплитуда волны стандартной формы, приложенная которой а. в. н. должен выдерживать в течение предписанного числа раз без разряда на нем или при числе разрядов, относительное количество которых не превышает нормированного.

185. **Гарантированная импульсная прочность.** Наибольшая амплитуда импульса стандартной волны, приложенная которой а. в. н. выдерживает без разрядов или каких-либо других повреждений изоляции.

186. **Вольтсекундная характеристика.** Зависимость между напряжением разряда на а. в. н. под воздействием импульсов стандартной волны изменяющейся амплитуды и временем запаздывания разряда.

187. **Изоляционные расстояния.** Кратчайшие расстояния в воздухе или жидкой изолирующей среде между токоведущими частями а. в. н., находящимися под потенциалами различных фаз или фаз и земли.

188. **Расстояния по поверхности.** Кратчайшие расстояния для пути тока утечки по поверхности твердой изоляции между частями, находящимися под потенциалами различных фаз и земли.

189. **Испытание напряжением:** а) между полюсами а. в. н. и землей; б) между полюсами а. в. н.; в) между разомкнутыми контактами одного полюса а. в. н. Испытание изоляции коммутационного а. в. н.: а) между его токоведущими и заземленными частями; б) между токоведущими частями различных полюсов; в) между контактами одного полюса а. в. н. в отключенном положении.

3. Характеристики нагрева а. в. н. при длительной работе

190. **Окружающая среда.** См. п. 169 ГОСТ 2774-44.

191. **Холодное состояние.** См. п. 179 ГОСТ 2774-44.

192. **Превышение температуры.** См. п. 171 ГОСТ 2774-44.

193. *Нагретое состояние.* См. п. 172 ГОСТ 2774-44.
 194. *Установившаяся температура.* См. п. 173 ГОСТ 2774-44.
 195. *Предельно-допустимая температура.* См. п. 174 ГОСТ 2774-44.
 196. *Предельно-допустимое превышение температуры.* См. п. 175 ГОСТ 2774-44.
 197. *Рабочая температура.* См. п. 176 ГОСТ 2774-44.
 198. *Нормированная температура окружающей среды.* См. п. 177 ГОСТ 2774-44.

4. Характеристики устойчивости а. в. н. при сквозных токах короткого замыкания и характеристики отключающей и включающей способности коммутационных а. в. н.

199. *Ток устойчивости а. в. н. (для данного промежутка времени).* Ток сквозного короткого замыкания, выдерживаемый а. в. н. в течение данного промежутка времени, определяемый в зависимости от величины промежутка времени или расчетным током термической устойчивости для этого промежутка или предельным сквозным током.

200. *Предельный сквозной ток.* Наибольший ток сквозного короткого замыкания, выдерживаемый а. в. н., в случае коммутационного аппарата в его полностью включенном положении, превышение значения которого недопустимо даже при самых малых промежутках времени.

Примечание. Предельный сквозной ток а. в. н. определяется его амплитудой и эффективным значением, причем при установлении гарантируемого поставщиком предельного сквозного тока а. в. н. его коэффициент амплитуды принимается равным 1,73, а при испытании определяется в зависимости от относительного содержания аperiodической составляющей отношением

$$\frac{I_a \sqrt{2} + I_c}{\sqrt{I_a^2 + I_c^2}},$$

где I_a — эффективное значение периодической составляющей;

I_c — среднее значение аperiodической составляющей.

201. *Расчетный ток термической устойчивости для данного промежутка времени.* Ток сквозного короткого замыкания постоянной величины, выдерживаемый а. в. н., в течение данного промежутка времени только в термическом отношении (т. е. без превышения температуры, допустимой для соответствующих частей при токах короткого замыкания).

Примечание. Отношение между значениями расчетного тока термической устойчивости для каких-либо двух промежутков времени равно обратной величине отношения корней квадратных из значений этих промежутков; при этом величина расчетного тока термической устойчивости для малых промежутков времени может превышать величину предельного сквозного тока а. в. н.

202. *Расчетный одnoseкундный ток термической устойчивости.* Расчетный ток термической устойчивости а. в. н. для промежутка времени, равного одной секунде.

203. *Десятисекундный ток.* Расчетный ток термической устойчивости а. в. н. для промежутка времени, равного 10 сек.

204. *Кратность предельного сквозного тока.* Отношение эффективного или соответственно амплитудного значения предельного сквозного тока а. в. н. к соответствующему значению его номинального тока.

205. *Кратность расчетного тока термической устойчивости (для данного промежутка времени).* Отношение расчетного тока термической устойчивости а. в. н. для данного промежутка времени к его номинальному току.

206. *Ток отключения коммутационного а. в. н. при данном напряжении.* Гарантируемый для коммутационного а. в. н. ток, который он может отключать при стандартных условиях отключения в стандартном цикле испытания при данном напряжении цепи.

207. *Номинальный ток отключения.* Ток от а. в. н. при напряжении, равном номинальному.

208. *Предельный ток отключения.* Наибольшее значение тока отключения а. в. н. при напряжениях ниже номинального.

209. *Мощность отключения при данном напряжении.* Произведение тока отключения при данном напряжении и для трехфазной цепи, умноженное на $\sqrt{3}$.

210. *Восстанавливающееся напряжение.* Напряжение восстанавливающееся на контактах коммутационного аппарата после погасания в нем дуги, слагающееся из напряжения основной частоты и наложенных на него колебаний собственных частот.

211. *Восстанавливающееся напряжение промышленной частоты.* Эффективное значение линейного напряжения основной частоты восстанавливающегося напряжения отключения в многофазных цепях — среднее из значений для отдельных фаз.

212. *Частота собственных колебаний сети.* Частота колебаний, обусловленных емкостями и индуктивностями, возникающих на контактах коммутационного аппарата после отключения в предположении, что процесс отключения происходит в идеальных условиях, т. е. что сопротивление дугового промежутка изменяется от нуля до бесконечности в момент естественного прохождения тока через нуль.

213. *Скорость восстанавливающегося напряжения.* Большая или средняя скорость нарастания восстанавливающегося напряжения от момента погасания дуги до первого пика напряжения.

214. *Длительность дуги коммутационного а. в. н.* Межуток времени от момента расхождения контактов коммутационного а. в. н. до момента окончательного погасания дуги.

215. *Ток включения.* Гарантируемый для коммутационного а. в. н. ток, который он может включать при стандартных условиях включения и при стандартном испытании при данном напряжении сети.

5. Механические характеристики коммутационных аппаратов

216. *Собственное время отключения коммутационного а. в. н.* Промежуток времени от подачи команды на отключение до начала расхождения контактов коммутационного а. в. н.

217. *Время отключения.* Промежуток времени от подачи команды на отключение а. в. н. до момента окончательного погасания дуги.

218. *Время включения.* Промежуток времени от подачи команды на включение а. в. н. до момента замыкания цепи тока аппаратом (до момента касания контактов).

219. *Кинематическая характеристика.* Зависимость между ходом траверсы или перемещением подвижных частей аппарата и углом поворота его вала (или жала) или углом поворота какого-либо другого элемента механизма).

220. *Угол поворота вала а. в. н.* Угол поворота коммутационного а. в. н. при его полном включении или отключении.

221. *Момент на валу а. в. н.* Наибольшее значение вращающего момента на основном валу коммутационного а. в. н. при медленном неоперативном включении.

222. *Обратный момент на валу а. в. н.* Величина вращающего момента на валу, необходимая для удержания подвижной части коммутационного а. в. н. при его полном положении.

223. *Статическая характеристика включения и отключения.* Зависимость вращающего момента в каком-либо элементе механизма а. в. н. от угла поворота или угла хода при медленном включении и соответствующем отключении коммутационного а. в. н.

224. *Скорость отключения (в момент расхождения контактов или др.).* Скорость траверсы или подвижных частей при отключении коммутационного а. в. н., измеренная в момент расхождения дугогасительных контактов.

225. *Скорость включения (в момент касания контактов или др.).* Скорость траверсы или подвижных частей при включении коммутационного а. в. н.

включении коммутационного а. в. н., например, от касания дугогасительных контактов.

Динамическая характеристика включения и отключения. Зависимость момента от угла поворота или усилия при включении и отключении коммутационного а. в. н. со скоростями, соответствующими работе его ма — с учетом сил инерции, но без учета сил от короткого замыкания.

Кривые скорости включения и отключения. Зависимость траверсы или подвижных контактов коммутационного а. в. н. от хода или от угла поворота какого-либо элемента механизма.

Испытание а. в. н. на механическую стойкость. Испытание приведение в действие коммутационного а. в. н. с его приводом для проверки надежности его в механическом отношении.

Общие характеристики отдельных видов а. в. н.

Защитная характеристика предохранителя высокого напряжения. Зависимость времени отключения с учетом дуги предохранителя высокого напряжения отключаемого тока при данном напряжении.

Номинальный ток предохранителя. Наибольший из токов плавких вставок, применяемых в предохранителе данного типа.

Номинальный ток плавкой вставки предохранителя. Указанный на плавкой вставке предохранителя, ток работы при котором она предназначена.

Ток отключения предохранителя при данном напряжении. Наибольший ток короткого замыкания сети (контрактный бы при шунтированном предохранителе), при котором гарантируется надежная работа предохранителя при данном напряжении.

Реактивная мощность реактора в омах. Реактивное сопротивление реактора при номинальной частоте в омах.

Относительная реактивная мощность реактора. Отношение реактивной мощности на реакторе при номинальном токе к активной мощности фазному напряжению реактора:

$$X = X_{\Sigma} \cdot \frac{I_n \cdot \sqrt{3}}{U_n} \text{ в долях единицы,}$$

$$X_{\%} = X_{\Sigma} \cdot \frac{I_n \cdot \sqrt{3}}{U_n} \cdot 100 \text{ в процентах.}$$

Пробивное напряжение разрядника. Наименьшее промышленной частоты или импульсное, при котором пробивается искровой промежуток разрядника.

Сопровождающий ток разрядника. Ток промышленной частоты, протекающий через разрядник после пробоя искрового промежутка.

Наибольший ток отключения выхлопного (трубчатого) разрядника. Наибольшее гарантируемое значение тока отключения выхлопным (трубчатым) разрядником при заданных, препятствующих его дальнейшей работе.

238. Наименьший ток отключения выхлопного разрядника. Наименьшее гарантируемое значение тока, при отключении которого в выхлопном разряднике происходит гашение сопровождающего тока.

239. Остаточное напряжение на вентильном разряднике. Падение напряжения на вентильном разряднике при прохождении через него наибольшего гарантируемого отключаемого тока.

240. Вольтамперная характеристика вентильного разрядника. Зависимость между падением напряжения на вентильном разряднике и величиной проходящего через него тока.

241. Класс точности трансформатора тока или напряжения. Категория трансформаторов тока или напряжения по их точности, определяемой диапазоном гарантируемых погрешностей при номинальной вторичной нагрузке.

242. Номинальный или действительный коэффициент трансформации трансформатора тока (напряжения). Отношение номинального первичного тока трансформатора тока (первичного напряжения трансформатора напряжения) к его номинальному или соответственно к действительному вторичному току (вторичному напряжению).

243. Токовая погрешность (погрешность в напряжении) трансформатора тока (напряжения). Погрешность в токе (в напряжении), выраженная в процентах от первичного тока (напряжения) по формуле

$$\epsilon = \frac{K_n A_2 - A_1}{A_1} \cdot 100,$$

где K_n — номинальный коэффициент трансформации; A_1, A_2 — первичный и соответственно вторичный ток (напряжение).

244. Угловая погрешность трансформатора тока (напряжения). Угол между вектором первичного тока (напряжения) и повернутым на 180° вектором вторичного тока (напряжения).

245. Кратность первичного или вторичного тока трансформатора тока. Отношение действительного тока в первичной или вторичной цепи трансформатора тока к его номинальному первичному или соответственно вторичному току.

246. Наибольшая кратность вторичного тока трансформатора тока. Наибольшее значение кратности вторичного тока трансформатора тока при заданной вторичной нагрузке и при любых значениях первичного тока.

247. Десятипроцентная кратность трансформатора тока. Кратность первичного тока, соответствующая токовой погрешности, равной 10%, при заданной вторичной нагрузке.

248. Ток небаланса защитного трансформатора тока. Значение неуравновешенного вторичного тока (тока ошибки) в схемах защит дифференциального типа при номинальном вторичном токе.



Проект стандарта на номинальные напряжения стационарных электрических сетей¹

Инженеры Н. Г. БЫКОВ и А. Р. ГЕРШТЕЙН

Теплоэлектропроект Ленинградское отделение

Ниже излагаются результаты исследовательской работы, выполненной в 1949—1950 гг. Теплоэлектропроект с целью выяснения, какие из двух напряжений, 15 или 20 кв, в большей мере отвечает перспективам развития кабельных сетей советских энергосистем.

Технико-экономические показатели отдельных видов электрооборудования. Показатели по оборудованию 6 и 10 кв принимались согласно преysкурantным данным 1949 г., для 15 и 20 кв калькулировались на основе конструктивных расчетов, для генераторов, кроме того, рассчитывались и значения к. п. д.

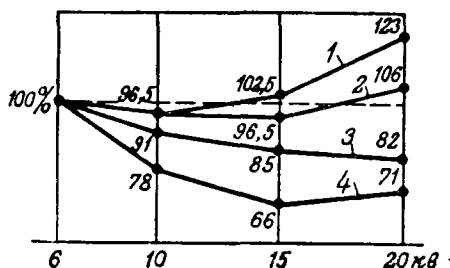


Рис. 1. Процентные соотношения удельных показателей по сетям 6—20 кв районных подстанций.

1 — капиталовложения; 2 — эксплуатационные расходы; 3 — потери энергии; 4 — расход цветного металла.

За 100% приняты удельные показатели по сетям 6 кв: капиталовложения — 430 руб/кат; потери энергии — 6,3% кат; вес цветного металла 11,2 кг/кат; эксплуатационные расходы — 83 руб/кат.

Как следует из табл. 1—4, с ростом напряжения до 15—20 кв цены на оборудование значительно увеличиваются, особенно для напряжения 20 кв. Однако относи-

Таблица 1

Соотношение стоимостей (%) и значения к. п. д. генераторов

| Мощность, кат | Напряжение, кв | | |
|---------------|----------------|-------|------|
| | 10 | 15 | 20 |
| 25 000 | 102 | 110 | 125 |
| | 97,55 | 97,36 | 97,1 |
| 50 000 | 100 | 105 | — |
| | 97,72 | 97,71 | — |

Примечания: 1. Верхние цифры — стоимости; нижние цифры — значения к. п. д.

2. Для мощностей 12 и 25 тыс. кат за 100% принята стоимость генератора 6 кв, а для 50 тыс. кат — стоимость генератора 10 кв.

¹ см. Электричество, № 1, 4—7, 8, 1950, № 1, 1951.

тельный рост полных капиталовложений по объектам сетей должен быть значительно ниже гаемого роста заводских цен на оборудование, около половины затрат на сетевые сооружения к строительно-монтажным расходам, сравнительно меняющимся с увеличением напряжения в пре 20 кв.

Повышение генераторно-распределительного ния, очевидно, может быть выгодно до такого у, котором эффект удорожания оборудования еще превышает экономического эффекта, получаемого жения числа и сечения кабельных линий и сниж тель энергии и расхода цветного металла.

Г

Соотношение стоимостей трансформаторов с ным напряжением 6—20 кв (%)

| Пределы мощности, ква | Напряжение, кв | |
|-----------------------|----------------|-----|
| | 15 | 20 |
| 100—180 | 108 | 112 |
| 320—1 000 | 105 | 110 |
| 1 800—5 600 | 102 | 108 |

Примечания: 1. За 100% принята стоимость трансф 10 кв.

2. Коэффициент полезного действия трансформаторов п независящим от первичных напряжений — 6—20 кв.

3. Стоимость трансформаторов 35—110 кв с вторичными ниями 6, 10, 15, 20 кв принималась одинаковой.

Г

Соотношение стоимостей аппаратуры (%)

| Аппарат | Напряжение, кв | |
|--|----------------|-----|
| | 15 | 20 |
| Выключатель серии МГГ | 125 | 125 |
| Выключатель серий ВМГ и МГФ | 135 | 135 |
| Выключатель нового типа 20 кв | — | — |
| Трансформаторы тока разных типов | 110—120 | 125 |
| Разъединители | 130 | 130 |

Примечания: 1. За 100% принята стоимость аппарату 10 кв.

2. Предполагается, что для напряжения 15 кв могут быт нены типы выключателей ВМГ и МГФ; для 20 кв взмзнен их с необходимой новой конструкции выключателей.

Экономические показатели систем распределения по кабельным сетям 6—20 кв. Повышение ния распределительных сетей энергосистем приводит личению зоны экономического охвата нагрузок, укруп сетевых районов и сокращению числа районных п ций. Сравнительный анализ систем распределения по сетям 6—20 кв, строго говоря, должен был бы водиться с учетом изменения схем построения сете

Таблица 4

Шенные стоимостей и весов цветного металла кабелей (%)

| Напряжение, кВ | 10 | 15 | 20 |
|------------------------------|-----|-----|-----|
| Сечения жил, мм ² | 120 | 185 | 220 |
| 16—25 | 112 | 136 | 173 |
| 50—70 | 115 | 147 | 195 |
| | 107 | 118 | 130 |
| 120—150 | 103 | 136 | 147 |
| | 104 | 109 | 112 |

Примечание: 1. Верхние цифры — усредненные для смежных стоимостей, а нижние — веса цветного металла.
2. 10% приняты цены и веса металла для кабелей 6 кВ.
3. Кабелей 15 и 20 кВ предполагалась новая конструкция с экранированными жилами.
4. Свинца учтен с коэффициентом 0,4.

напряжения 35—110 кВ. Однако учет этого обстоятельства при выполнении анализа в общем виде практически невозможен, так как повышение напряжения распределительных сетей может оказать различное влияние на развитие сетей 35—110 кВ, в зависимости от конкретных той или иной энергосистемы. Вследствие этого проведенное исследование ограничено рассмотрением сценария снабжения потребителей на генераторном напоре, иначе говоря, анализировалась совокупность по электрической части источника питания, питающих сетей 6—20 кВ и распределительным заводским сетям. Условие неизменности схемы сетей 6 кВ является допущением, невыгодным для варианта повышенного напряжения. Поэтому, если в результате элементарного анализа определяются благоприятные показатели для одного из повышенных напряжений, в практических условиях построения системных сетей этого напряжения должны проявиться, очевидно, и другие.

При проектировании и строительстве кабельных линий вызывает общность основных принципов их коммутирования большинства отраслей промышленности, что отчасти и к городским коммунальным сетям.

Это позволило проанализировать удельные расходы в зависимости от основных влияющих факторов: нагрузки предприятий, расстояния до источника и процентной величины нагрузки крупных электростанций, а для коммунальных сетей в зависимости от плотности нагрузки.

Поэтому расчетов была принята широко применяемая в электроснабжении промышленных предприятий, делением энергии по цехам через коммутационные соединяемые с источником питания раздельно районными кабельными линиями. Рассматривались случаи предприятий с нагрузками от 3 до 25 тыс. кВт и понижающих подстанций районного типа, а также от собственных промышленных станций. Расходы по электростанциям определялись в зависимости к условиям тэц высокого давления с генераторной мощностью по 25 тыс. кВт. Расчеты велись для случаев питания от районной и 1,25 км от собственной подстанции или подстанции. Среднее расстояние от источников до коммутационных пунктов принималось в соответствии с чем производился расчет затрат на распределительные кабели разных сечений. По коммунальным удельные расходы определялись применительно к районам с многоэтажной застройкой. Средняя удельных расходов определялась из расчета, что удельная нагрузка складывается на 80% из нагрузок массивов с погонной плотностью 0,2 кВт/м и на 20% из нагрузок жилых массивов с погонной плотностью 0,1 кВт/м.

Таблица 5

Допустимые и экономические нагрузки одиночного кабеля, проложенного в траншее, кВ

| Напряжение, кВ | 6 | 10 | 15 | 20 |
|---|-------|-------|-------|--------|
| Сечения жил, мм ² : минимальное | 830 | 1 200 | 2 100 | 3 600 |
| | 200 | 310 | 750 | 1 550 |
| 70 | 2 500 | 3 700 | 5 100 | 6 500 |
| | 1 100 | 1 800 | 2 700 | 3 600 |
| 150 | 4 000 | 6 200 | 8 500 | 10 300 |
| | 2 300 | 3 800 | 5 900 | 7 800 |

Примечание: 1. Верхние цифры — допустимые нагрузки, нижние — экономические, найденные по плотности тока 1,8 а/мм² для минимальных и 1,5 а/мм² для прочих сечений.

2. Минимальные сечения жил: для кабелей 6 и 10 кВ — 10 мм², для 15 кВ — 16 мм², для 20 кВ — 25 мм².

В результате суммирования удельных расходов по электрической части источников питания, питающим сетям и распределительным сетям получены приведенные в табл. 6 средние величины расходов в целом по системе электропередачи от источника питания до высоковольтных токоприемников включительно. В этой таблице отдельно даны показатели: а) по сетям крупных предприятий,

Таблица 6

Средние величины суммарных расходов на электрическую часть источника питания, кабельную сеть и токоприемники 6—20 кВ

| Расходы по варианту сети 6 кВ | Расходы в процентах от расходов по варианту сети 6 кВ | | |
|---|---|--------------|--------------|
| | 10 кВ | 15 кВ | 20 кВ |
| а) Сеть районной подстанции или станции | | | |
| Капиталовложения $\frac{420}{530}$ руб/кВт | 96,5 98 | 102,5 103 | 123 121 |
| Потери энергии $\frac{6,3\%}{9,4\%}$ | 91 95 | 85,5 94 | 82,5 94 |
| Расход цветного металла $\frac{11,2}{12}$ кг/кВт | 78,5 80 | 66 67 | 71,5 71 |
| Эксплуатационные расходы $\frac{83}{121}$ руб/кВт | 96,5 98 | 96,5 100 | 106 107 |
| б) Сеть подстанции или станции крупного предприятия | | | |
| Капиталовложения $\frac{320}{430}$ руб/кВт | 103 103 | 108 109 | 120 123 |
| Потери энергии $\frac{5,65\%}{8,7\%}$ | 94,5 99 | 90,5 98 | 87,5 93 |
| Расход цветного металла $\frac{7,1}{7,9}$ кг/кВт | 86 86 | 74,5 75 | 74,5 74,5 |
| Эксплуатационные расходы $\frac{72}{109}$ руб/кВт | 98,5 101 | 99,5 104 | 105 113 |

б) Сеть подстанции или станции крупного предприятия

| | | | |
|---|-------------|-------------|--------------|
| Капиталовложения $\frac{320}{430}$ руб/кВт | 103 103 | 108 109 | 120 123 |
| Потери энергии $\frac{5,65\%}{8,7\%}$ | 94,5 99 | 90,5 98 | 87,5 93 |
| Расход цветного металла $\frac{7,1}{7,9}$ кг/кВт | 86 86 | 74,5 75 | 74,5 74,5 |
| Эксплуатационные расходы $\frac{72}{109}$ руб/кВт | 98,5 101 | 99,5 104 | 105 113 |

Примечание: 1. Цифры в числителе относятся к случаю, когда источником питания является подстанция, в знаменателе — электростанция.

2. Процентные значения потерь энергии (включая полные потери в генераторах, трансформаторах и крупных двигателях) исчислены по отношению к энергии, вырабатываемой генераторами, за вычетом расхода на собственные нужды станции.

3. При определении эксплуатационных расходов стоимость потерь электроэнергии исчислялась по 16 коп/кВтч; ежегодные отчисления на амортизацию, ремонт и обслуживание принимались 6% от капиталовложений на кабельные линии и 1% от капиталовложений на все другие сетевые сооружения.

питаемых от собственной электростанции или подстанции с небольшой составляющей коммунальной нагрузки, порядка 10%; б) по сетям районной станции или подстанции с нагрузкой, состоящей на 80% из промышленной и на 20% из коммунальной. Составляющая нагрузки высоковольтных двигателей принималась 25%. Удельные расходы определены по отношению к 1 кВт нагрузки источника питания; при этом учитывалось, что вследствие одновременности максимальных нагрузок отдельных питающих и распределительных кабельных линий их суммарная пропускная способность значительно превышает величину совмещенного максимума нагрузки данного сетевого района, и потому при суммировании расходов составляющие затрат на распределительную и питающую сети увеличивались в обратной зависимости от величин коэффициентов одновременности. Изменение удельных показателей с ростом напряжения сети иллюстрируется кривыми рисунка, построенными на основе данных табл. 6 для случаев питания потребителей от районной подстанции (соответственно верхним цифрам табл. 6). Следует отметить, что полученная на основе обобщенного анализа размерность изменения удельных показателей для сетей 6—20 кВ, представленная цифрами табл. 6, проверялась путем проектных прикидок, выполненных для ряда конкретных предприятий, и нашла в них достаточное подтверждение.

Результаты анализа в части экономической характеристики сетей 15 кВ показывают следующее: а) внедрение напряжения 15 кВ должно дать значительную экономию цветного металла, порядка 25—35% от расхода его в сетях 6 кВ и до 12% от расхода в сетях 10 кВ; б) экономия на потерях энергии в сетях, распределяющих энергию от станций, будет относительно невелика, так как эффект снижения потерь в кабелях уменьшается вследствие увеличения потерь в генераторах и появления дополнительных потерь на трансформацию энергии, потребляемой собственными нуждами станций и крупными заводскими электродвигателями. В сетях районных подстанций экономия на потерях энергии составит более заметную величину (отпадает влияние составляющей потерь в генераторах и трансформаторах собственных нужд станций); в) капиталовложения по сетям 15 кВ получились на 3—6% выше, чем по сетям 6—10 кВ, что является единственным неблагоприятным показателем для сетей 15 кВ; г) разница в эксплуатационных расходах по сетям 6—10—15 кВ в большинстве рассмотренных случаев весьма невелика, так как возрастание ежегодных отчислений, обусловленное ростом капиталовложений на сети 15 кВ, компенсируется снижением расходов на потери энергии.

Для напряжения 20 кВ в общем определились значительно худшие экономические показатели, особенно по капиталовложениям, относительно небольшое возрастание которых при переходе от 10 к 15 кВ более резко проявляется при переходе от 15 к 20 кВ. Величина потерь энергии для сетей 20 кВ получилась лишь немногим меньше, чем для сетей 15 кВ. Это уменьшение определилось только для случая питания потребителей от подстанций. Для сетей 15 и 20 кВ, распределяющих энергию от станции, потери энергии получились практически одинаковыми (табл. 6, стр. 2 и 6 — нижние цифры).

Это объясняется тем, что с повышением напряжения потери в кабелях становятся по абсолютной величине настолько небольшими, что их снижение с переходом от напряжения 15 и 20 кВ получается соизмеримым с возрастанием потерь в генераторах вследствие уменьшения их к. п. д. Расход цветного металла по сетям 20 кВ получил-

ся выше, чем по сетям 15 кВ. Это объясняется весом кабелей 20 кВ сечением менее 3×25 мм² и большим весом свинцовой оболочки, что сказывается на возрастании расхода цветного металла в распределительных сетях. В питающих сетях 20 кВ не достигают существенного снижения расхода цветного металла по сравнению с 15 кВ, так как нагрузки отдельных питающих кабелей в большинстве случаев не настолько велики, что переход от напряжения 15 к 20 кВ мог привести к значительному числу питающих кабелей и чаще дает лишь незначительное сечение. Между тем, наиболее эффективное снижение капиталовложений, так и веса цветного металла получается именно при сокращении числа линий.

Таким образом, результаты анализа показывают, что по расходу цветного металла и потерям энергии при повышении напряжения кабельных сетей для широкого круга потребителей оправдывается, и тем более внедрение этого напряжения не оправдывается, если не учитывать капиталовложений в дополнительные расходы, которые по сетям 20 кВ получились значительно больше, чем для напряжений 6—15 кВ.

Правильное решение вопроса выбора стандартных напряжений в диапазоне 6—35 кВ заключается в равномерном ее заполнении ступенями 6—10—20 кВ, а в определении такого дополнительного напряжения, при котором: а) пропускная способность кабелей хорошо сочетается с масштабами нагрузок питающих и распределительных сетей; б) обеспечивались бы возможности быстрого освоения районных сетей энергоснабжения; в) создавались бы условия изготовления аппаратуры структурно аналогичной аппаратуре 6—10 кВ, т. е. условия быстрого освоения выпуска генераторов и трансформаторов; г) можно малом отличии в ценах и величинах к. п. д. сравнении с генераторами 6—10 кВ.

Этим условиям в наибольшей степени удовлетворяет напряжение 15 кВ. Пропускные способности кабелей большого сечения — 7000 кВА и малого сечения — 1000 кВА перекрывают обычно встречающиеся нагрузки от питающих и распределительных линий. Дальность передачи энергии по кабельным и воздушным линиям для промышленно-коммунальных сетей может достигать 20 км. Напряжение 15 кВ, в отличие от напряжения 10 кВ, хорошо сочетается с твердо упрочившимся в наших системах напряжением 35 кВ. Внедрение напряжения 15 кВ потребует наименьших отклонений от технологии производства электрооборудования 6—10 кВ, причем в условиях совершенствования техники массового производства в меньшей мере будет проявляться относительное удорожание цен на оборудование 15 кВ в сравнении с 6—10 кВ. В сельских сетях, ввиду малой разницы в стоимости трансформаторов и предохранителей 6—10 кВ и 15 кВ, последнее напряжение должно получить наибольшее распространение, исключив применение напряжения 20 кВ.

Результаты анализа показывают целесообразность внедрения напряжения 15 кВ для замены во вновь строящихся сетях напряжения 10 кВ. Отмеченное сокращение расходов в проекте нового ГОСТ на напряжение 10 кВ следует распространить не только на крупные генераторы 100 тыс. кВт, но также на аппаратуру, кабели и генераторы мощностью 12, 25 и 50 тыс. кВт, не включая в стандарт напряжения 20 кВ.



СЛЕДОВАНИЕ СВАРОЧНОЙ ДУГИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ В ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Защитная газовая среда может употребляться при сварке тогда, когда присадочный металл не является в то же время одним из электродов сварочной ванны. В этом случае шлаковая защита сварочной ванны является газовой защитой; для образования сварочной ванны основная роль принадлежит (и присадочный), и оба электрода берутся вольфрамовые или угольные, вследствие своей тугоплавкости, не переходя в расплавленное состояние в сварочную ванну.

В настоящей работе произведено сравнительное исследование свойств водорода, аргона и их смесей в качестве защитных газовых сред с точки зрения воздействия их на сварочные характеристики дугового разряда большой мощности (200—1000 а).

В проведенных опытах дуга возбуждалась между электродом — катодом (диаметр 15 мм) и горючей расположенной пластинкой из малоуглеродистой стали — анодом.

При работе дуги производилось от генератора постоянного тока 60 в, 1000 а. Водород и аргон поступали из баллонов в особую камеру у конца электрода, которая имела кольцевую щель для выхода газа, создававшего вокруг дуги сплошную газовую завесу.

В первой серии опытов защитной средой был аргон, расход которого менялся от 7 до 20 л/мин. Стальная пластина перемещалась со скоростью 1,8 см/сек. На поверхности оставался след расплавленного металла в виде тонкой полосы с гладкой или неровной поверхностью, покрытой газовыми раковинами или без них. Ширина полосы изменялась приблизительно пропорционально току сварочного напряжения и тока записывались магнитным осциллографом. Управление всеми операциями во время опыта производилось автоматически. В результате было установлено, что достаточный расход аргона для заметного качественного улучшения процесса по сравнению с незащищенной дугой расход в 7 л/мин.

В водороде. При расстоянии отверстия для выхода газа от пластины, равном 25 мм, достаточный расход оказался 3,5 л/мин. В водороде дуга не

использованы смеси водорода и аргона. Наибольшая дуга была в смеси водорода 3,5 л/мин и аргона 7 л/мин. Хотя наилучшей устойчивостью обладала защищенная аргонном при расходе в 7 л/мин, из-за высокой стоимости этого газа, применять его экономически невыгодно. Поэтому заслуживает практического интереса смеси из аргона и водорода в качестве защитного газа совмещают в себе лучшие химические свойства водорода и благоприятные электрические свойства аргона, давая в то же время устойчивую дугу.

(Известия Академии наук СССР, ОТН, № 10, 1950. Г. М. Тиходеев)

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НАГРУЗКИ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При переходе к объединению удаленных электроэнергетических систем режим работы межсистемной линии электропередачи приобретает особо важное значение в составе факторов, определяющих эффективность объединения.

Нахождение режима работы межсистемной линии электропередачи, который соответствовал бы суммарному минимуму расходов топлива на покрытие потерь энергии в линии и на транспорт топлива системы по железной дороге, представляет актуальную задачу. Вопросы, связанные с выбором пропускной способности межсистемной линии передачи, требующие самостоятельного рассмотрения, в статье не затрагиваются.

Уравнения (11) и (12) позволяют определить величины передаваемых по межсистемной линии потоков мощности гЭС и тЭС, при которых достигается указанный выше суммарный минимум расходов топлива. Использование такого режима работы систем позволяет снизить величину мощности, передаваемой по межсистемной линии, при неизменном эффекте, определяемом вытеснением мощностей тепловых электростанций гидроэлектростанциями.

Уравнение (11) для нахождения величины встречного потока мощности тепловых электростанций

$$N_T = (N_{T2}^0 h_{20} - N_{T2} h_2) \beta_2 - \left(\pm \frac{n_2}{n_3} \right).$$

Уравнение (12) для нахождения величины мощности гЭС, которую целесообразно передавать по межсистемной линии связи:

$$N_{T3} = N_{T2} (h_2 \beta_2 - 1) + N_{T2}^0 (1 - \beta_2 h_{20}) \pm \frac{n_2}{n_3}.$$

N_{T2} — участие гЭС, расположенных в системе 2 (принимая энергию гидроэлектростанций), в покрытии максимума нагрузки этой системы; N_{T2}^0 — участие гЭС в покрытии нагрузки системы 2; h_2 — продолжительность использования нагрузки системы 2, покрываемой гидроэлектростанциями, входящими в эту систему; h_{20} — продолжительность использования нагрузки системы 2, покрываемой гЭС, при наличии объединения; β_2 — коэффициент, характеризующий конфигурацию графика нагрузки системы 2, равный числу часов использования пикового и полупикового нагрузки в относительных единицах (за единицу принято 24 часа); n_2 — коэффициент пропорциональности, равный расходу топлива на перевозку топлива в систему 2, эквивалентного 1 кВтч; n_3 — коэффициент пропорциональности, характеризующий удельный расход топлива на тепловых электростанциях.

Знак + или — перед последним членом уравнений относится соответственно к одностороннему или встречному потоку электроэнергии и топлива.

Установление целесообразного режима оказывает существенное влияние на выбор величины и размещение резервных мощностей в отдельных системах, входящих в объединение.

(Известия Академии наук СССР ОТН, № 6, 1950.
А. Н. Златопольский)

ЗА РУБЕЖОМ

ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЕ КОММУТАЦИИ

Катодный осциллограф позволяет получить действительную картину мгновенных значений токов и напряжений в секциях обмотки якоря машины постоянного тока, находящихся в процессе коммутации. Такое исследование было предпринято с целью углубления изучения коммутации в надежде, что полученные результаты помогут усовершенствовать машины постоянного тока и расширить границы их применения. Результаты проведенной работы иллюстрируются типовыми осциллограммами.

В качестве объекта для опытов был взят тяговый двигатель последовательного возбуждения с обмоткой якоря по три секции в пазу. Исследованию коммутации подверглись все три опытные секции одного паза, причем предполагалось, что секции всех других пазов выполнены аналогично и должны так коммутироваться, как и опытные.

На рис. 1 показано схематическое размещение измерительных витков в исследуемых секциях. По осям трех соседних полусекций укладывались тонкие изолированные проводники. Один конец каждого тонкого проводника электрически соединялся с концом соответствующей полусекции вблизи коллекторного петишка, а другой конец выводился наружу через узкое отверстие в головке секции, противоположной коллектору. Наружные концы всех шести измерительных проводников присоединяются к шести контактным кольцам. Такое устройство позволяет исследовать коммутационный процесс в трех лежащих рядом секциях одного паза.

Для осциллографирования тока используется метод измерения активного падения напряжения самой секции, вызываемого током короткого замыкания. Направление э. д. с., индуцируемых в проводниках, показано маленькими стрелками на рис. 1.

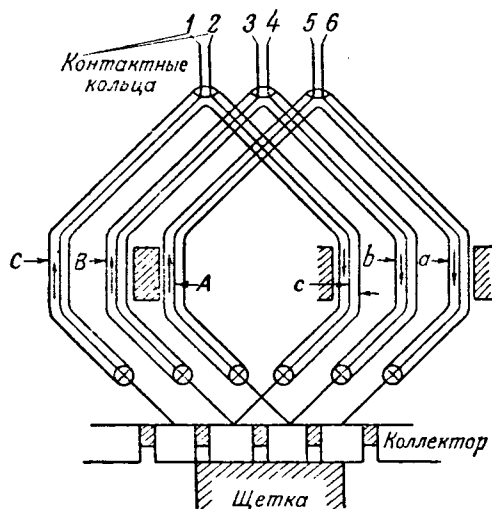


Рис. 1.

Если допустить, что индуцируемые э. д. с. во всех измерительных проводниках равны э. д. с., индуцируемым в соответствующих полусекциях, тогда алгебраическое сложение всех э. д. с. контура, которые действуют между парой контактных колец 5 и 6, равно нулю, так как они одинаковы по величине и противоположны по направлению. Поэтому между контактными кольцами 5 и 6 будет измеряться напряжение, возникающее лишь вследствие активного падения напряжения в секции А. Изменение

разности потенциалов контактных колец во время тации может быть принято пропорциональным из тока коммутации секции. Соответственно разности потенциалов контактных колец 3 и 4 пропорциональна току в секции В, а между кольцами 1 и 2 — току в секции С.

С помощью этих же измерительных проводов можно изучить изменение напряжения между секциями коллекторными пластинами, если сделать допущение, что во всех проводниках одного паза индуцируется одна и та же э. д. с. Как известно, индукция в коммутационной зоне невелика. Поэтому такое допущение не вносит серьезных погрешностей.

На рис. 1 видно, что напряжение секции А берется между кольцами 4 и 6, секции В — между 2 и 4 и секции С — между кольцами 1 и 3.

На рис. 2 показана серия осциллограмм. Осциллограммы 1—6 иллюстрируют изменение тока в трех секциях во время коммутации. Осциллограммы 7—12 показывают изменение напряжения между секциями коллекторными пластинами, которые соединены с исследуемыми секциями.

В осциллограммах 1—3 и 10—12 кривые сдвинуты относительно друг друга по вертикали для удобства рассмотрения полученных мгновенных значений напряжений. Подлинное расположение по вертикали токов и напряжений дано на осциллограммах 7—9.

При регулировании тока дополнительных полюсов достигается «наилучшей» компенсации при нагрузке 830 а и скорости вращения $n = 600$ об/мин получены осциллограммы 2, 5, 8, 11. Осциллограммы 7, 10 относятся к случаю чрезмерно сильного доп. полюсов или, другими словами, при «перекompенсации». Осциллограммы 3, 6, 9, 12 получены при противоположных условиях — «недокомпенсации».

В обоих последних случаях — «перекompенсации» и «недокомпенсации» — наблюдалось значительное искрение. «Наилучшая» компенсация обнаружила искрение балла.

Отсчет времени на осциллограммах производится вправо. Поэтому исследуемые секции подвержены коммутации в алфавитном порядке. Секция А — первая, В — вторая и С — третья. Масштаб времени перед четвертой линией на осциллограммах рис. 2. Отрез

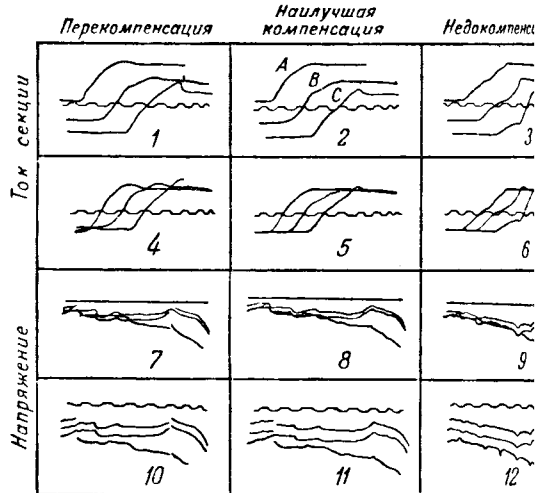


Рис. 2.

линии измерены в масштабе единиц коллекторных пластин. Для получения этого масштаба применялись щетки, которые крепились к щеткодержателю.

Такие же осциллограммы были получены и при нагрузке 450 а и скорости вращения $n = 1950$ об/мин. В этом случае при «наилучшей» компенсации коммутации была темной. При «перекompенсации» и «недокомпенсации» также наблюдалось значительное искрение. Для наглядности осциллограммы рис. 2 вычерчены в

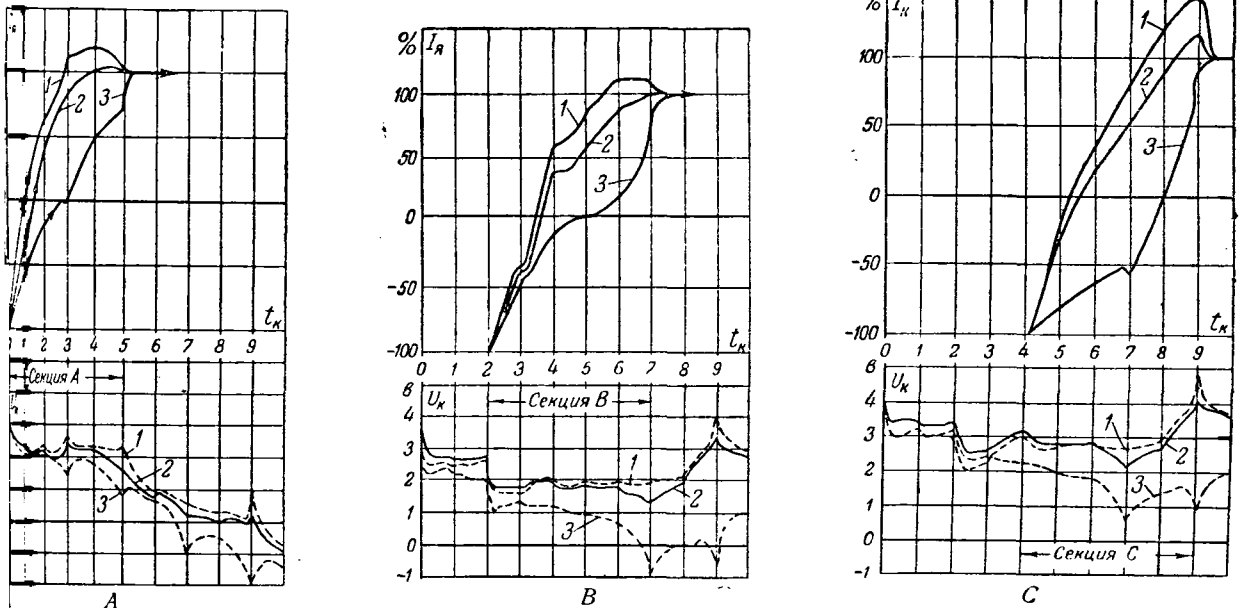


Рис. 3.

при коммутации в процентах от тока якоря; U_K — приближенное значение напряжения между смежными ламелями; t_K — время, текущее повороту коллектора на одно коллекторное деление; 1 — ток коммутации и напряжение между смежными ламелями при перекомпенсации; 2 — то же при наилучшей компенсации; 3 — при недокомпенсации.

ных координатах на рис. 3, А, В, С. Эта серия рисунков показывает скорость изменения токов коммутации и времени.

При рассмотрении этих осциллограмм следует выделить момент, в который исследуемая секция зашунтирована коротко или размыкается и соответствующий момент для другой секции, способной оказать влияние на изменение тока или напряжения в изучаемой секции.

Шкала единицы времени на рис. 3 служит для определения времени, в течение которого коллектор поворачивается на половину ламели. Рис. 4 иллюстрирует фазы коммутации секций А, В и С.

Изменение тока. Руководствуясь порядком следования времени и фаз якорных секций, принятым на рис. 3, трудно обнаружить причины большинства изменений кривых токов. Секция А первая начинает показывать ток в направлении часовой стрелки. Следующей будут коммутировать две другие секции в том же порядке. Секция А замыкается коротко в момент 0, и короткое замыкание этой секции длится в момент 5, секция В замыкается коротко в момент 2 и размыкается в момент 7, соответствующие моменты для секции С будут 4 и 9.

На рис. 3 отмечено время окончания коммутации исследуемой секции. Точка 6 соответствует нулевой точке кривой катушки.

Влияние дополнительных полюсов. Влияние дополнительных полюсов отрегулировано на «наилучшую» компенсацию, то при этом ток коммутации изменяется с такой скоростью, чтобы по прошествии периода короткого замыкания достиг величины, соответствующей току двигателя. Ток секции В изменяется согласно с этим условием, что подтверждается кривой тока рис. 3, В. Напротив, для секции А и С, как при «наилучшей» компенсации, и, наоборот, в случае «перекомпенсации», нарушается это условие. В обеих секциях (А и С) ток короткого замыкания превышает ток нагрузки двигателя в момент выхода из-под щетки. Осциллограммы иллюстрируют перекомпенсацию и для случая так называемой «недокомпенсации».

Влияние дополнительных полюсов. Влияние дополнительных полюсов отрегулировано на «наилучшую» компенсацию, то при этом ток коммутации изменяется с такой скоростью, чтобы по прошествии периода короткого замыкания достиг величины, соответствующей току двигателя. Ток секции В изменяется согласно с этим условием, что подтверждается кривой тока рис. 3, В. Напротив, для секции А и С, как при «наилучшей» компенсации, и, наоборот, в случае «перекомпенсации», нарушается это условие. В обеих секциях (А и С) ток короткого замыкания превышает ток нагрузки двигателя в момент выхода из-под щетки. Осциллограммы иллюстрируют перекомпенсацию и для случая так называемой «недокомпенсации».

Скорость, с которой ток секции изменяется в течение периода коммутации, зависит от величины потока дополнительных полюсов и от взаимной индукции остальных секций паза. Последние имеют тенденцию замедлить скорость изменения тока в коммутируемой секции. Это можно наблюдать в точке 2 рис. 3, А, где происходит изменение наклона кривой тока для условий «наилучшей» компенсации, показывающее, что скорость изменения тока секции А уменьшается, когда секция В замыкается коротко. Уменьшение скорости изменения тока значительно сильнее выражено для секции В в точке 4 рис. 3, В при закорачивании щетками секции С.

Скорость изменения тока в рассматриваемой секции теоретически должна возрастать в момент размыкания щетками какой-либо другой секции этого паза. В точке 3 скорость изменения тока коммутации секции А увеличивается при размыкании катушки, лежащей впереди секции С при работе двигателя с «недокомпенсацией». Это также верно и для секции С в точке 7, где происходит размыкание закороченной секции В при «недокомпенсации».

Кривые напряжения осциллографировались, по словам автора, для того, чтобы лучше выявить искрение

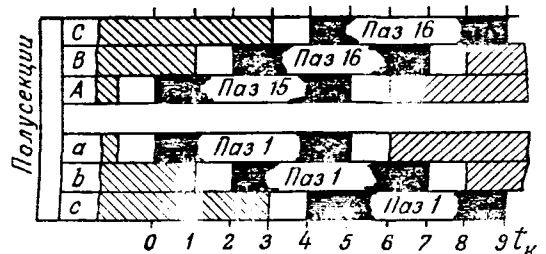


Рис. 4. Периоды коммутации секций (зачернены).

под щетками и еще как вспомогательное средство для масштаба времени. Из-за несовершенства схемы низкочастотные процессы сильно искажались. Вычислениями установлено уменьшение полученных значений напряжения на 32% в начале процесса коммутации. Поэтому при вычерчивании кривых напряжения рис. 3 принята приближительная поправка — 5 в. Таким образом, показанные абсолютные значения на рис. 3 следует считать приближенными. Интересно также представить влияние, оказываемое изме-

нением условий коммутации на наклон кривых напряжения.

Если рассмотреть точку 9 рис. 3, С, то можно видеть, что при «перекомпенсации» пик кривой напряжения направлен вверх, а при «недокомпенсации» пик в этой точке направлен вниз.

Одними кривыми напряжения невозможно исследовать коммутацию. Но, указывает автор, кривые напряжения и кривые тока совместно могут дать объяснение, какое же явление служит причиной искрения: слишком быстрое или слишком медленное изменение тока секции?

Осциллограммы позволяют обнаружить эффект, оказываемый регулированием потока дополнительных полюсов и взаимоиндукцией на скорость изменения тока коммутации. Исследования обнаруживают трудность получения одинаковой коммутации для нескольких секций, лежащих в одном пазу. Также показано, что даже для «нзлучшей» компенсации, т. е. при наивыгоднейших условиях коммутации, щеткам приходится поглощать остаточные напряжения коммутирующих секций.

Теория коммутации подтверждается этими исследованиями, и они, по мнению автора, содействуют лучшему пониманию процесса коммутации машин постоянного тока.

Приложение к рассматриваемой статье содержит описание техники проведенных исследований.

Читателям журнала Электричество известна работа послевоенного времени советских научных работников в области применения катодного осциллографа для исследования коммутации машин постоянного тока (М. Ф. Карасев «Исследования коммутации машин постоянного тока катодным осциллографом», опубликованная в журнале Электричество, № 7, 1948 раньше, чем рассматриваемая статья).

Широкой популярностью пользуются работы по исследованию коммутации коллекторных машин акад. К. И. Шенфера. По многообразию методов и по глубине познания природы коммутации труды акад. К. И. Шенфера и других ученых Советского Союза далеко опередили научные достижения по коммутации электрических машин в капиталистических странах.

Следует отметить, что описываемый в настоящем реферате метод осциллографирования токов коммутации без добавочного сопротивления в исследуемой секции еще в 30-х годах применялся К. И. Шенфером и сотрудниками его лаборатории ВЭИ. В то время К. И. Шенфер обосновал теоретически и практически непригодность метода Э. Арнольда осциллографирования коммутационных токов с включенным сопротивлением в разрез исследуемой секции. К. И. Шенфер предложил метод, названный им «бифилярным витком», который позволяет осциллографировать ток коммутации без включения добавочного сопротивления в разрез секции.

(Transactions AIEE, т. 68, стр. 100, 1949. М. J. Baldwin)

Кандидат техн. наук Л. М. ШИЛЬДИНЕР

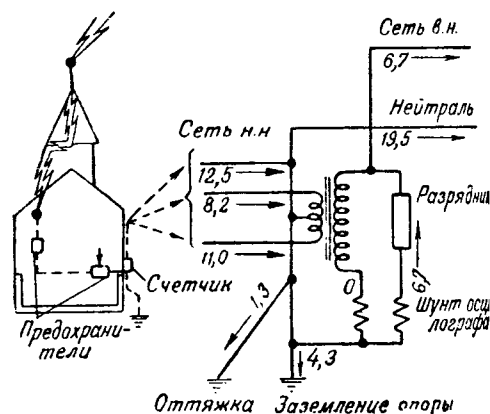
ИССЛЕДОВАНИЕ ГРОВОНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕЛЬСКОЙ СИСТЕМЕ

В штате Пенсильвания (США) в период с 1944 по 1947 гг. проводилось исследование грозовых перенапряжений. Сельская система напряжением 7,2 кВ с многократно заземленной нейтралью, в которой проводились исследования, имела длину сетей около 750 км и 1350 потребителей

ских трансформаторов, защищенных деонными ками. В этом районе число грозовых дней составило 36 до 48 в год.

Полярность и величина разрядных токов из магнитными регистраторами с пределами измерения до 30 ка. Разряды измерялись также автоматическими осциллографами. Сопровождающие токи регистрировались автоматическими магнитными осциллографами. Часть деонных разрядов оборудованных магнитными регистраторами, о лась после каждой грозы. Данные исследований «ряднико-лет» в линии длиной 13,6 км показали, зовой разряд часто вызывает действие нескольких ников. Один крупный разряд вызвал срабатывание рядников на линии в 5 км.

По данным магнитных регистраторов 40% разрядов срабатывали один раз в год, 19% два раза, 1 раз и 2,7% — четыре раза и более. В среднем разрядник приходилось 1,1 срабатываний в год. В года 0,36% всех разрядников имели разрядный ток 30 ка, 50% менее 0,2 ка и 67% менее 0,1 ка. За 8 форматоро-лет 120 разрядов достигли трансформатора, вызвав 86 срабатываний разрядников. Наиболее разряд, отмеченный 17-ю регистраторами, проник в колокольни церкви и проник в систему низкого напряжения. На рисунке показаны направления отрицательного разряда и величина ших токов в ка. В обмотке высшего напряжения тельского трансформатора тока не было вследствие что весь ток прошел через разрядник.



Путь разряда в шпиль колокольни и величина токов на трансформаторном пункте в ка.

Осциллограмма тока в разряднике показала его величину 3,5 ка, так как максимальный пик тока 6,7 ка, записанный магнитным регистратором, был слишком кратковременным и не записан на ленту. Ток упал до 0,003 сек. Затем последовало шесть повторных пиков с пиком тока менее 0,09 ка, прекратившихся через 0,003 сек.

(El. Engineering, т. 68, № 9, 1949. Transactions т. 68, ч. 1, 1949. D. D. Mc Carthy, D. A. Stann, D. R. M. C. Mc Kinley).

Доктор техн. наук И. А. Б

ПРОДОЛЬНАЯ ЕМКОСТНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

(Обзор)

Пропускная способность электропередачи высокого напряжения в значительной мере определяется условиями работы параллельной работы электростанций системы, в свою очередь, зависят от ряда факторов: от величины реактивного сопротивления электропередачи. Одним из методов увеличения пропускной способности электропередачи является последовательное включение статических конденсаторов, что уменьшает реактивное сопротивление линии передачи и эквивалентно сокращению ее длины.

Последовательное включение статических конденсаторов позволяет выбрать номинальное напряжение конденсаторов значительно меньше рабочего напряжения передаваемой линии, изолировав корпуса конденсаторов от земли.

В этом случае номинальное напряжение статических конденсаторов будет определяться падением напряжения на конденсаторе при протекании через него рабочего тока линии.

При возрастании тока, например, вследствие короткого замыкания будет возрастать и напряжение на конденсаторах. При коротком замыкании на участке линии, от компенсирующей конденсаторной установки, напряжение на конденсаторах может настолько возрасти, что приведет к их пробое.

Для предотвращения увеличения токов короткого замыкания для изолированной линии и появления недопустимых величин напряжения на обкладках конденсаторов при коротком замыкании довести компенсацию реактивного сопротивления линии передачи до 100%, т. е. до полной компенсации, технически невозможно, поэтому применяется частичная компенсация линии в пределах не выше

15—30%. Во избежание пробоя конденсаторов при возрастании напряжения должны быть предусмотрены защитные меры. В осуществленных и проектируемых установках для емкостной компенсации в качестве защитных устройств применяются устройства, шунтирующие конденсаторы при повышении напряжения (разрядник, а также выключатель). Разрядник должен поддействовать и отключать конденсаторы в течение первого полупериода короткого замыкания, выключатель же ограничивает время разрядки.

Необходимость шунтирования статических конденсаторов при протекании через них токов короткого замыкания является отрицательным моментом этого устройства, так линия декомпенсируется как раз в момент, когда требуется обеспечения устойчивости параллельной работы станций, особенно необходима. Это заставляет требовать повышения гарантийного напряжения, которое выдерживают последовательно включенные конденсаторы. Именно при расстановке этих конденсаторов в сети необходимо принимать меры, чтобы они шунтировались при повреждении на участке линии, на котором установлены и не шунтировались при повреждении этого участка.

На рис. 1 приведена зависимость напряжения на конденсаторах (кратность по отношению к номинальному напряжению конденсатора), подсчитанная для шведской линии 220 кВ в Альфта — при коротком замыкании на изолированной линии и вне ее — при различных степенях компенсации.

При повреждении на линии вблизи конденсаторов в степени компенсации выше 15—30% кратность напряжения на конденсаторах изменяется в пределах 5—6, при повреждении и при тех же пределах компенсации кратность напряжения на конденсаторах равна 2—3.

В работе дается обзор выполненных установок для продольной емкостной компенсации линий электропередачи.

Линия передачи 220 кВ Стадсфорсен—Галльсберг (Швеция). Эта линия длиной 480 км передает электроэнергию из северной части Швеции в центральную. При этом в середине линии, в пункте Альфта, в электропередачу включена последовательно установка статических конденсаторов.

Степень компенсации равна 20%, увеличение пропускной способности линии 25% (от 140 до 177 тыс. кВт). Установленная мощность последовательных конденсаторов составляет 31,4 тыс. квар. Конденсаторы в каждой фазе подразделены на две ветви и каждая ветвь на две группы. Конденсаторы применены обычного косинусного типа производства двух фирм, ACEA и Сивертс.

В таблице приведены характеристики последовательных конденсаторов, примененных для установки 220 кВ в Альфта.

| | ACEA | Сивертс |
|---|------|---------|
| Номинальная единичная мощность конденсатора, квар | 33 | 23 |
| Номинальное напряжение единичного конденсатора, кВ | 1,63 | 1,81 |
| Число групп, соединенных параллельно на фазу | 2 | 2 |
| Число подгрупп, соединенных последовательно в каждой группе | 7 | 5 |
| Число единиц, соединенных параллельно на подгруппу | 13 | 20 |
| Число единиц на фазу | 182 | 200 |

Батарея для емкостной компенсации ACEA составлена из единичных конденсаторов, имеющих реактивную мощность 33 квар и рабочее напряжение 1630 в. Эти конденсаторы соединены в последовательно-параллельные группы: по 7 конденсаторов последовательно и 2×13 таких групп параллельно. Хотя для установки были выбраны стандартные косинусные конденсаторы, что определило выбор рабочего напряжения и номинальной мощности единичных конденсаторов, однако для данных конденсаторов были предусмотрены более суровые испытания, чем это требовалось для обычных косинусных конденсаторов по шведскому стандарту.

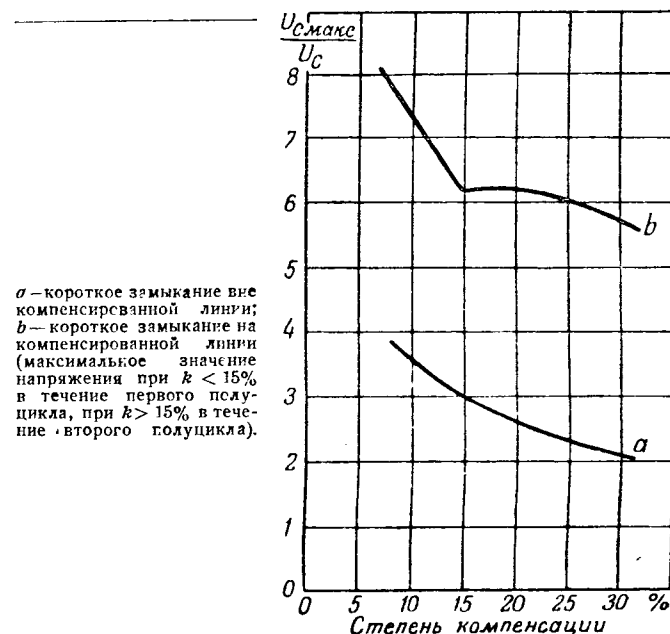


Рис. 1. Максимальные значения напряжения на серийных конденсаторах при коротком замыкании.

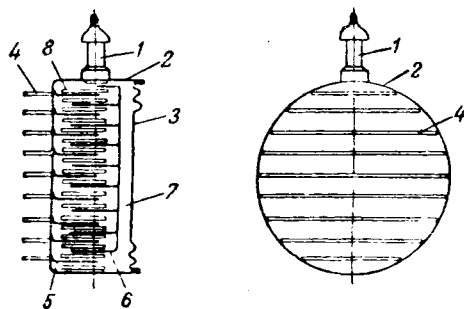


Рис. 2. Схема конструкции единичного конденсатора.

1 — выводной изолятор; 2 — корпус; 3 — крышка корпуса; 4 — охлаждающие ребра; 5 — обкладки, припаянные к корпусу; 6 — изолированные обкладки; 7 — масло; 8 — бумага, пропитанная маслом.

Каждый единичный конденсатор испытывался напряжением постоянного тока, достигающим шестикратного действующего значения рабочего напряжения переменного тока. Далее, в течение 2 мин конденсатор подвергался трем испытаниям на разряд при напряжении постоянного тока, превышающем в 5 раз рабочее напряжение. Дополнительное испытание проводилось в течение 5 сек напряжением переменного тока 50 гц, превышающим нормальное рабочее значение в 3,5 раза.

Схема конструкции конденсатора показана на рис. 2. Фольговые обкладки конденсаторных секций сдвинуты в противоположные стороны; края их выступают с торцов (безиндукционная намотка). Одна система обкладок припаяна к стенке корпуса для улучшения передачи тепла; для усиления теплоотдачи от корпуса в окружающую среду к этой стенке приварены охлаждающие ребра. Вторая система обкладок изолирована от корпуса и присоединена к выводному изолятору. Корпус имеет цилиндрическую форму; крышка, впаянная в корпус, образует собой мембрану, компенсирующую температурные изменения объема залитого масла.

Применение охлаждающих ребер позволило примерно вдвое снизить максимальное значение температуры перегрева внутри конденсатора, что обеспечило резкое повышение его срока службы.

Применение повышенного давления масла (2—3 ат избыточных) позволило примерно в два раза повысить рабочее значение напряженности поля в диэлектрике конденсатора. Пробивная напряженность, соответствующая времени выдержки под напряжением порядка 100—200 час., повысилась на 40% по сравнению с конденсаторами, в которых масло находится при нормальном давлении.

Большое внимание было уделено надежной герметизации корпуса. Применялась специальная сварка швов, выводной изолятор впаян. Вакуумная сушка и пропитка проводились для каждого единичного конденсатора в отдельности.

Обкладка конденсатора, не соединенная с корпусом, разрезана на 7 частей, имеющих отдельные выводы. Каждый из этих выводов присоединяется к общему выводу, идущему к изолятору, через индивидуальный плавкий предохранитель.

Таким образом, каждый единичный конденсатор содержит 7 параллельно соединенных секций. Пробой любой из этих секций не приводит к пробое конденсатора в целом, так как пробитая секция отсоединяется от общего вывода при перегорании предохранителя. Кроме того, наличие предохранителя предупреждает возможность срабатывания защитного устройства и отключение всей батареи, если какая-либо из секций не пробита, а будет потреблять увеличенный ток.

Вся батарея конденсаторов крепится к стальной конструкции при помощи подвесных гирлянд и изолируется на напряжение 220 кв. Такая установка позволяет легко заменять или заменять отдельные конденсаторы. Вес всего устройства составляет 200 г, из них на конденсаторы приходится 75 г. Вес отдельного конденсатора составляет 45 кг, что соответствует 1,36 кг/квар.

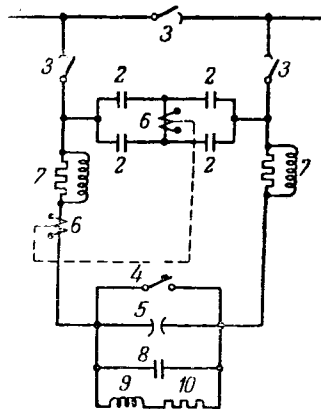


Рис. 3. Принципиальная однолинейная схема защиты серийных конденсаторов.

1 — линия 220 кв; 2 — конденсаторы; 3 — разъединитель; 4 — масляный выключатель; 5 — искровой промежутки; 6 — трансформатор тока; 7 — демпфирующий элемент; 8 — защитный конденсатор; 9 — разрядный реактор; 10 — серийное активное сопротивление.

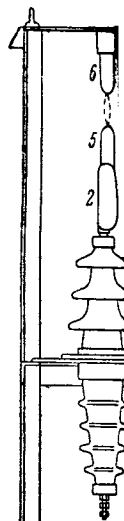


Рис. 4. Защитный разрядник. 1—2 — металлические тропки; 3 — металлическая подставка; 4—5 — искровые электроды, удерживаемые на металлических электродах; 6 — графитный элемент.

Принципиальная схема защитного устройства приведена на рис. 3. Для защиты конденсаторов в каждой фазе батареи установлен защитный разрядник. Для гашения дуги искрового промежутка разрядника шунтируется выключателем, который используется же для эксплуатационных включений и отключений реи. Искровой промежуток разрядника пробивается напряжением 85 кв_{макс}, что соответствует 29 кв напряжению батареи конденсаторов. Устройство разрядника видно на рис. 4.

При прохождении тока короткого замыкания искровой промежуток от трансформатора тока, установленного в цепи, через реле с выдержкой времени посылаются включающий импульс на шунтирующий выключатель, обратный отключающий импульс дается через реле. Если дуга продолжает гореть, выключатель производит окончательный включающий импульс. Поскольку линия 220 кв оборудована быстродействующей релейной защитой с временем действия порядка 0,1—0,2 сек, шунтирующий выключатель обычно не должен работать.

В качестве выключателя принят стандартный объемный масляный выключатель на 40 кв, помещен на площадке, изолированной от земли на напряжение 200 кв. Передача движения производится от электропривода, установленного на земле, и осуществляется посредством вращающихся фарфоровых колонок.

Схема защиты батарей конденсаторов имеет следующие устройства вспомогательного назначения: 1) защитный конденсатор 0,1 мкф, предназначенный для отсечения пробоя искрового промежутка волнами атмосферного перенапряжения; 2) демпфирующее устройство, предназначенное для гашения заряда конденсаторов в работе искрового промежутка или включении шунтирующего выключателя; 3) разрядное устройство для разряда батарей конденсаторов за время 0,3 сек при отключении линии 220 кв.

Батарея последовательных конденсаторов, состоящая из четырех групп, включена по схеме, подобной мосту Уитстона, в диагональ которого включен трансформатор тока 220 кв. При повреждении в установке, например при пробое проходного изолятора конденсатора мостика нарушается и токовая релейная защита, посылающая импульс на выключатель, который через 1 сек шунтирует батарею.

Описываемая установка в Альфтах продольной емкостной компенсации линии 220 кв была включена в эксплуатацию в январе 1950 г. и успешно прошла пусковые испытания.

ния 66 кв Филлипс—Крусбл (США). Небольшая установка последовательно включенными конденсаторами в эксплуатацию в 1947 г. Эта установка с общей емкостью конденсаторов 10 000 квар оборудована на линии Филлипс—Крусбл длиной 22,5 км, питающей электрический завод и имеет целью уменьшить диапазон напряжения в сети. Конденсаторы установочные, косинусного типа на номинальное напряжение 15 кв, мощность 15 квар в единице, допускающие полную кратковременную перегрузку. Защитные разрядники выполнены в виде искровых промежутков с граничными электродами; батарея и разрядники могут быть заменены контактором. Открытая установка конденсаторов выполнена в металлических шкафах, конструкции являются вторым полюсом установок и изолированы от земли опорными изоляторами 69 кв. Защитные разрядники также установлены в этих шкафах.

Проектируемая линия 380 кв Гарспренгет—Галльсберг (Швеция). При проектировании линии 380 кв были произведены расчеты применения продольной емкостной компенсации. При 40% компенсации нагрузка линии может быть снижена с 375 до 495 тыс. квт, стоимость передачи киловольт-ампер снижается на 20%.

Мнения рецензентов. 1. Продольная емкостная компенсация является весьма эффективным средством повышения пропускной способности линий передач, требует больших капитальных затрат и вводит в схему передачи дополнительный элемент, эксплуатационная надежность которой должна быть обеспечена на уровне не ниже надежных элементов передачи.

Сведений о надежности работы установок с продольной емкостной компенсацией еще нет. Имеются лишь сведения о работе статических конденсаторов шунтового типа, применяемых для целей улучшения коэффициента мощности. Для последовательных конденсаторов, условия эксплуатации которых тяжелее, требуется повышение их надежности в работе.

Включение в схему мощной системы передачи последовательно включенного элемента — батареи конденсаторов — вносит новые весьма существенные явления в передачу, которые изучены совершенно недостаточно (материалы, опубликованные в иностранной литературе, весьма скудны и не могут быть использованы для изучения вопроса).

Изучены переходные явления, в частности, коммутационные перенапряжения в компенсированных линиях, резонансные явления при включении, явления перенапряжений, субгармонических резонансов, раскачивания в цепях с последовательными конденсаторами и пр. Требуют изучения вопросы режимов работы продольной емкостной компенсации, совместного действия продольной и поперечной компенсации длинных линий, вопросы эксплуатации установок продольной компенсации, совершенно недостаточно проработаны вопросы этих установок.

Продольная емкостная компенсация длинных линий является только одним из средств повышения пропускной способности передачи, причем достаточно сложным. Советские ученые и инженеры разработали эффективные и экономичные средства повышения надежности параллельной работы, а именно применение статических безинерционных регуляторов возбуждения, компаундирование синхронных машин, применение статических регуляторов возбуждения, применение метода работы синхронных генераторов в зоне искусственной устойчивости, применение быстродействующих безинерционных регуляторов напряжения и компаундирования синхронных машин накоплен значительный эксплуатационный опыт. В остальных вопросах проводится интенсивная исследовательская работа.

В заключение отметить такие меры повышения пропускной способности линий передачи, как специальные характеристики генераторов и применение расщепленных проводов, которые являются простыми и экономичными. В этом, области применения для продольной компенсации, должны явиться очень напряженные режимы передачи высокого и сверхвысокого напряжения, для которых, для которых перечисленные выше меры более экономичны. С этой точки зрения для продольной емкостной компенсации намечаются весьма

широкие возможности применения, для чего необходима интенсивная научно-исследовательская работа и накопление экспериментального и, в особенности, эксплуатационного опыта. Описанные выше две установки продольной емкостной компенсации дают лишь первый подход к вопросу, не больше.

Литература

1. G. Jäneke, K. F. Åkerström. Последовательно включенный конденсатор в шведской сети. Teknisk Tidskrift, № 5, II, 1949.
2. Rusk and Rathsmann. Последовательно включенный конденсатор и расщепленные провода в шведской электропередаче, El. Eng., т. 69, № 1, 1950.
3. G. Jäneke and K. F. Åkerström. Применение последовательно включенного конденсатора в шведской электропередаче 220 кв. Доклад 332 на Международной конференции по большим сетям высокого напряжения, Париж, 1950.
4. N. Knudsen. Технические проблемы, возникающие при применении продольной компенсации, ASEA Tidning, № 7, 1950.
5. B. Zetterstedt. Продольная компенсация электропередачи 220 кв. ASEA. Tidning, № 7, 1950.
6. М. С. Баяхчев. Регулирование напряжения последовательно включенными конденсаторами, Электричество, № 9, 1949.

Инженер С. С. РОКОТЯН

Инженер Е. М. ЗБОРОВСКИЙ

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

НОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ДЛЯ СУХИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

(Обзор)

Измерительные трансформаторы на напряжения до 15 000 в строились либо в сухом исполнении, либо в металлических или фарфоровых баках, заполненных компаундом, а в некоторых конструкциях — трансформаторным маслом. В качестве твердой изоляции применялась пропитанная бумага, лакированные ткани и тому подобные материалы.

Разработанные в последнее время новые синтетические материалы позволяют перейти к совершенно новым методам изготовления и конструктивным формам измерительных трансформаторов и сходных с ними аппаратов. Принцип, лежащий в основе этого технологического процесса, заключается в том, что собранный аппарат заливается или опрессовывается мономерным искусственным изоляционным материалом с последующей его полимеризацией (без выделения летучих продуктов конденсации) в твердый изолирующий материал. Таким образом, этот технологический процесс изготовления трансформаторов принципиально отличается от процесса изготовления трансформаторов с пропитанной волокнистой изоляцией. При новом методе обмотки собираются на магнитопроводе без изоляции между первичной и вторичной обмотками и между обмоткой и сердечником (рис. 1). Между ними оставляются лишь соответствующие изоляционные промежутки. Затем собранный таким образом трансформатор вставляется в стальную прессформу соответствующей конфигурации, создающей внешние очертания готового трансформатора и обеспечивающей надлежащее взаиморасположение отдельных его частей. Далее изолирующая масса вводится под давлением в форму и заполняет все свободные пространства между отдельными элементами трансформатора. После запрессовки в форму и выдержки в течение определенного времени и при соответствующей температуре, которые необходимы для полимеризационного процесса, из формы вынимается полностью изолированный трансформатор в готовом виде (рис. 2).

Материалом, весьма пригодным по своим свойствам для использования в качестве основы прессуемой изоляции, является полиизобутилен — синтетический каучукообразный материал, представляющий собой полимер изобутилена. Следует отметить, что в деле создания синтетических каучуков приоритет принадлежит нашей стране: А. М. Бут-

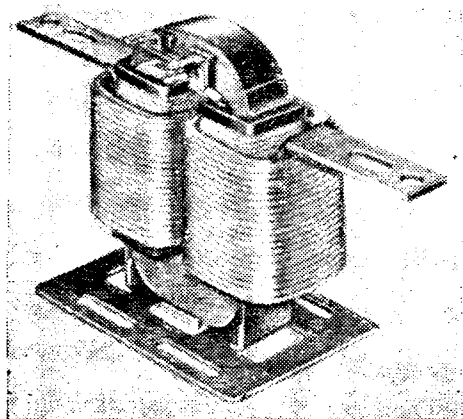


Рис. 1. Собранный трансформатор тока на 5000 в до опрессовки синтетической изоляцией.

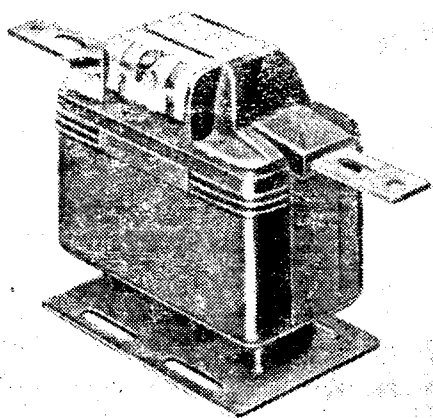


Рис. 2. Трансформатор тока, изображенный на рис. 1, после опрессовки изоляцией на основе бутил-каучука.

леров впервые установил способность изобутилена полимеризоваться и еще в 1869 г. получил первый в мире синтетический каучук — полиизобутилен.

Полиизобутилен благодаря насыщенному характеру связей между атомами углерода и водорода, входящими в состав его молекулы, химически инертен и не поддается вулканизации серой или другими катализаторами. Прибавление к нему 3% изопрена делает его способным к вулканизации путем добавления примерно 0,5% серы. Для возможности использования полученного таким образом полиизобутилена в качестве прессующей массы к нему добавляют различные наполнители, придающие материалу более высокую твердость и механическую прочность. Специальные исследования показали, что наличие в бутил-каучуке незначительного количества серы не приводит к сколько-нибудь существенной коррозии меди, впрессованной в бутил-каучукую массу.

Всесторонние испытания подтвердили хорошие свойства изоляции на основе бутил-каучука. В широком диапазоне температур и влажностей он обладает более высокой пробивной напряженностью, чем, например, бумага, пропитанная асфальтовым лаком. Прочность на растяжение у бутил-каучуковой массы изменяется в широких пределах при изменении температуры так же, как и у битуминизированной бумаги. Однако, при средней рабочей температуре трансформатора в пределах от 85° до 95° бутил-каучук обладает большей прочностью, чем битуминизированная бумага. При комнатной температуре прочность равна 50 кг/см², а при 80° она все еще составляет



Рис. 3. Проходной трансформатор напряжения на с опрессованной синтетической изоляцией

15 кг/см². Бутил-каучук весьма эластичен: удлинением при разрыве при комнатной температуре достигает 68% и 30% у битуминизированной бумаги. Это свойство дает трансформаторам с опрессованной изоляцией тил-каучуковой массы весьма высокую устойчивость в сверхтоках, так как они способны выдерживать во время при этом механические усилия без повреждения изоляции. Необходимо указать на то, что новый вид изоляции обеспечивает высокую электродинамическую прочность даже многовитковых трансформаторов ток которой, в которой этого до сих пор не удавалось достигнуть. Это объясняется тем, что обмотки по отношению от одного ввода до другого, заключены в тазер из изолирующего материала и поэтому не могут рвать

Водопоглощаемость бутил-каучука не превышает в отношении действия органических растворов и дает более высокой стойкостью, чем битуминизированная бумага. В противоположность последней, бутил-каучук подвержен действию кислот и щелочей. Он обладает более высокой огнестойкостью, что особенно с точки зрения пожаробезопасности электроустройств, в которых работают измерительные трансформаторы.

Электрические свойства изоляции на основе каучука достаточно высоки. Пробивная напряженность при температуре 40° составляет 160 кВ/см против 140 кВ/см у битуминизированной бумаги; при температуре 60° соответствующие значения равны 140 кВ/см против 60 кВ/см. В отношении диэлектрических потерь бутил-каучук имеет значительное преимущество. Обширные исследования на старение подтвердили высокие свойства трансформаторного бутил-каучука. Точно так же он хорошо выдерживает длительное воздействие высокой влажности. Испытания бутил-каучуковой массы показали, что при напряженностях вплоть до 70 кВ/см в ней не наблюдаются явления ионизации.

Бутил-каучуковая масса не является, конечно, единственным типом материала, пригодным для применения в качестве опрессованной изоляции. Дальнейшие исследования в этой области позволят разработать различные синтетических материалов с комплексом свойств, необходимых для каждого данного применения этого материала.

Новый метод изолировки с применением синтетической изоляции из синтетических изолирующих материалов обеспечивает огромные преимущества перед ранее применявшимися материалами. Кроме вышеуказанных преимуществ, несомненно следующее. Прессовка создает высокую точности внешних размеров и создает однородную структуру, полностью охватывающую высоковольтную часть пространства между обмотками и обмоткой и магнитопроводом и образующую сплошную оболочку вокруг всего трансформатора. Улучшенный вид трансформатора и обеспечивается его защитой от механических повреждений. Уменьшаются габариты трансформатора, что является весьма желательным только с производственной, но и с эксплуатационной точки зрения. Снижается расход активных и конструктивных материалов.

новый вид изоляции позволяет перейти к новым конструктивным исполнениям измерительных трансформаторов, среди которых следует указать, например, на проходные трансформаторы напряжения (рис. 3), компактные подтрансформаторы тока и др. Применение опрессованной синтетической изоляции позволяет расширить диапазон напряжений, в пределах которого могут быть изготовлены измерительные трансформаторы в сухом исполнении. Уже строятся сухие трансформаторы тока и напряжения для всех номинальных напряжений до 60 кВ. Уже ведутся работы по разработке и внедрению в производство сухих трансформаторов тока на 150 кВ. В ближайшее время измерительные трансформаторы с опрессованной синтетической изоляцией изготавливаются для установок. Однако дальнейшее исследование возможности их применения так же к наружной установке. Однако ли не решающее значение имеют преимущественного характера, вытекающие из применения рассматриваемого типа. Сюда относятся: значительное упрощение технологического процесса сборки трансформаторов, уменьшение количества

и трудоемкости ручных операций по изолировке отдельных деталей и собранного трансформатора, механизация производственного процесса и т. д.

Область применения опрессованной синтетической изоляции, естественно, не ограничивается измерительными трансформаторами, а распространяется, например, на мелкие дроссельные катушки, трансформаторы для радиоаппаратуры, мелкие силовые сухие трансформаторы и др.

Ведущиеся у нас в этой области обширные работы должны способствовать быстрейшему широкому внедрению этого вида изоляции в производство.

Литература

1. R. A. Pfuhtner, R. E. Franck, F. R. D'Entremont, *El. Eng.*, стр. 594, № 7, 1950.
2. A. Imhof, *Schweiz. techn. Zeitschr.*, т. 46, стр. 626, № 39, 1949.
3. A. Imhof, *Bull. ASE*, т. 40, стр. 409, № 13, 1949.
4. A. Imhof, *Bull. ASE*, т. 41, стр. 716, № 19, 1950.

Инженер А. Г. КРАЙЗ



МЕТКИ И ПИСЬМА

К СТАТЬЕ А. В. БЕРЕНДЕЕВА „О РАБОТАХ КРОНА“

(*Электричество*, № 12, 1950 г.)

Известный профессором А. В. Берендеевым на страницах «Электричество» вопрос об оценке работ Крона является актуальным и принципиальным, так как существует — это вопрос о применении в прикладной электротехнике тензорного анализа и матричной алгебры. В среде электротехников высказываются противоречивые взгляды на применение названных разделов математики в электротехнике. Имеются, безусловно, отрицающие пользу прикладного тензорного анализа и матричной алгебры. К сожалению, следует признать, что имеются и лица, пытающиеся в работах Г. Крона чуть ли не новую революцию в развитии электротехники. Поэтому опубликованные А. В. Берендеева, вносящие ясность в существующую ситуацию, необходимо приветствовать. А. В. Берендеев прав, указывая на содержащиеся в работах Крона элементы отнюдь не научного, а рекламного характера.

Вопрос сводится к тому, когда имеет смысл тензорный анализ с вводимыми в нем понятиями ковариантной производной, символами Кристоффеля и т. д. В задачах, рассматриваемых Кроном, да и некоторыми исследователями, сводится, в конечном счете, к решению систем интегро-дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Машинные перемены не имеют уравнения равновесия э. д. с. и напряжения в уравнениях с периодическими коэффициентами, эти уравнения могут быть разрешены только в том случае, если при помощи линейных преобразований

имеется возможность свести задачу к решению уравнений с постоянными коэффициентами (как это и делается на практике). Для всех систем, описываемых уравнениями с постоянными коэффициентами, понятие о ковариантной производной совпадает с понятием об обычной производной и, как справедливо отмечает А. В. Берендеев, символы Кристоффеля получили все элементы, равные нулю. Кроме того, оказывается достаточным применение только тензоров с рангом не выше второго, а при этом тензор может быть записан в виде матрицы.

Таким образом, следует сделать заключение, что для всех задач, рассмотренных Кроном, и вообще для подавляющего большинства задач современной электротехники, достаточно применения матричной алгебры. Применение же тензорного анализа вносит лишь усложнения, связанные с введением ряда новых понятий, но не дает ничего существенного, нового.

Таким образом, основные выводы А. В. Берендеева правильны. Острый стиль выступления, повидимому, помог немногочисленным «слепым» поклонникам Крона уяснить действительный смысл работ последнего. Сделать это следовало давно.

В целях обсуждения более рациональных методов применения тензорного анализа, следует просить проф. Берендеева опубликовать его работы по тензорному анализу и, в первую очередь, в части их практического применения.

Доктор техн. наук, проф. Л. Н. ГРУЗОВ



В Комиссии по истории физико-математических наук АН СССР

На 58-м и 59-м заседаниях Комиссии по истории физико-математических наук АН СССР, проведенных в Ленинграде в 1950 г., были заслушаны доклады проф. Я. Г. Дорфмана «Эпинус и его трактат о теории электричества», проф. Д. Б. Гогоберидзе «Жизнь и деятельность академика А. Я. Купфера» и члена-корр. АН СССР Т. П. Кравца «Об издании II-го тома экспериментальных исследований Фарадея по электричеству».

58-е заседание Комиссии состоялось под председательством академика С. И. Вавилова. Проф. Я. Г. Дорфман начал свой доклад с указания на значение Эпинуса (1724—1802) в истории физики XVIII века. Прибыв в 1757 г. по приглашению Петербургской академии в Россию Франц Ульрих Теодор Эпинус нашел здесь второе отечество, в котором прожил 45 лет до своей смерти в 1802 г. Своей новой родине он отдал все свои знания и труды. Основное место среди его многочисленных трудов по физике, математике, метеорологии и астрономии, опубликованных в Петербурге, занимает классический трактат «Опыт теории электричества и магнетизма» (1759), снискавший его автору всемирную известность. Всеобщее внимание привлек его «Сборник различных мемуаров о турмалине» (1752). В 1764 г. Эпинус изобрел и сконструировал первый ахроматический микроскоп. Таким образом, деятельность его в Петербурге была чрезвычайно плодотворна и разнообразна. Однако ему не удалось развернуть работы физического кабинета Академии наук, за что его неоднократно упрекал М. В. Ломоносов. На Эпинуса возлагались Екатериной II разнообразные обязанности. В 1760 г., или 1761 г., он был назначен директором по учебной части Сухопутного шляхетского кадетского корпуса. В 1765 г. Екатерина II назначила его преподавателем физики при наследнике Павле, освободив от работ в Академии, но сохранив за ним звание действительного члена. Затем Эпинус выполнял различные поручения Иностранной коллегии. В 1782 г. он был включен в Комиссию об учреждении народных училищ. Разработанная им «Записка об организации в России низшего и среднего образования» легла тогда в основу всей системы народного образования.

Осветив состояние науки об электричестве и магнетизме за рубежом и в России в сороковых и пятидесятых годах XVIII в., и отметив прогрессивность теорий русских ученых по сравнению с западными, докладчик напомнил, что в 1753 г. Петербургская академия авторитетно заявила устами Ломоносова, что она считает положение в области теории электричества совершенно неудовлетворительным и объявила конкурс на разработку обоснованной теории электричества. Ломоносов в своей замечательной речи «О явлениях воздушных, от электрической силы происходящих» наметил теорию электричества, основанную на микроскопическом вращательном движении частиц эфира. Из числа 13 работ, поступивших в 1755 г. на конкурс, Академия с необычайной прозорливостью присудила премию работе И. Эйлера, представлявшей дальнейший шаг в развитие теории Ломоносова: электрическое поле объяснялось натяжениями в эфире.

После трагической гибели Рихмана (1753 г.) Петербургской академией в 1757 г. был приглашен Эпинус. В 1759 г. Эпинусом был опубликован трактат «Опыт теории электричества и магнетизма». Незадолго до окончания книги Эпинус выступил в Петербурге с публичной «Речью о сходстве электрической силы с магнитною», из-

данной на русском, немецком и латинском языках в Петербурге, а затем перенесенной в Лейпциге.

Трактат Эпинуса «Опыт теории электричества и магнетизма», объемом в 400 страниц, написанный на немецком языке, никогда не переводившийся и не переведенный на теоретических расчетах и опытных данных Эпинуса. В основу теории электричества Эпинусом приняты Франклиновы воззрения, предполагающие существование одной электрической жидкости, которой означает положительный заряд, а недостаток отрицательный. Эпинус отказывается от объяснения электрического и магнитного полей, подчеркивая, что делает это потому, что считает этот вопрос еще не решенным, но не потому, что он разделяет взгляды мистической теории «действия на расстоянии». Эпинус решительно отвергает всяческие богословские аргументы в этом отношении. Таким образом, выясняется, что совершенно несправедливо историки науки, которые нередко приписывают Эпинусу защиту теории действия на расстоянии. Рассуждения Эпинуса о взаимодействиях между электрическими зарядами, задолго до открытия Кулоном его закона, на основании аналогии с тяготением и своих расчетов, предполагают, что сила взаимодействия должна убывать обратно пропорционально квадрату расстояния.

Крупным вкладом Эпинуса в науку является его открытие им электростатической индукции и электролиза, а также поляризации диэлектриков. Благодаря этому Эпинус впервые объяснил, почему наэлектризованные тела притягивают к себе легкие предметы. Далее Эпинус объяснил действие Лейденской банки, исправив ошибку в объяснении этого действия, сделанную Франклином. Эпинус впервые указал, что разряд Лейденской банки должен быть колебательным. Это было открыто спустя 100 лет Фелдерсоном.

Эпинус строит теорию магнетизма по принципам теории электричества. Он полагает, что существует магнитная жидкость, которая удерживается в ферромагнитных телах. Избыток магнитной жидкости обуславливает северный полюс, недостаток ее — южный полюс. Несмотря на то, что теория магнетизма Эпинуса содержит ряд слабых сторон и противоречит некоторым опытам (например, отсутствие магнитного поля при разрезывании магнита), ему удалось изложить свою теорию ряд ценных выводов. Так, он впервые объяснил, почему магнит притягивает немагнитные тела. Он также объяснил явление саморазмагничивания намагниченных коротких стержней. Далее Эпинус развил свою теорию на основе строгих расчетов наилучшие в то время «намагничивания магнитных стрелок, что представляло собой эпоху крупнейший вклад в практику. Рассмотрев теорию магнетизма, Эпинус считает несомненным наличие магнитного шара магнитного ядра. Эпинус впервые раскрывает, как должна вести себя магнитная стрелка в земном магнитном поле. Большой интерес представляет рассуждение Эпинуса о происхождении залежей магнитного железняка. Соображения Эпинуса в этом вопросе навеяны работами Ломоносова, доклад которого «Слово о рождении магнетизма от трясения земли», он слушал вскоре по возвращении в Петербург.

Трактат Эпинуса имел огромное значение для науки. О нем одобрительно отзывался итальянский физик В. Английский физик Кэвендиш отметил выдающиеся

Эпинуса; в самом деле, Эпинус впервые вплотную подошел к понятиям емкости и потенциала, за 12 лет до Фарадея. Высоко оценил трактат Эпинуса Кулон. Через 10 лет после выхода в свет трактата Эпинуса во Франции появилось популярное его изложение, причем, крупнейшие французские математики и физики Лаплас и Лекатель показали, что труд Эпинуса должен «создать эпоху в физике наук». Трактат Эпинуса, положивший начало системным расчетам в теории электричества и магнетизма, явился дальнейшим шагом после работы Рихмана и Ломоносова, положивших начало количественным и системным исследованиям электрических явлений.

В своем докладе Я. Г. Дорфмана, академик АН СССР, отметил как весьма своевременный и интересный факт — предполагаемое Комиссией издание трактата Эпинуса на русский язык, трактата «Опыт теории электричества и магнетизма», так как эта книга, при всех ее недостатках, является узловым звеном в истории развития учения об электричестве. Дорфман рекомендовал Комиссии заняться Эпинусом, в смысле восстановления его образа как ученого в целом, считая, что Эпинус был одним из крупнейших физиков XVIII в.

На 59-м заседании Комиссии (председательствовал член АН СССР Т. П. Кравец) проф. Д. Б. Гогобенко в докладе об академике А. Я. Купфере охарактеризовал личность А. Я. Купфера — сначала профессора Горного университета, затем академика и профессора педагогического института, Горного института путей сообщения. Основатель и первый директор Главной физической обсерватории, первый крупный русский геофизик, хранитель депо мер и весов и выдающийся русский метролог, крупнейший исследователь магнетизма и один из крупнейших кристаллографов своего времени — А. Я. Купфер оставил неизгладимый след в мировой науке. Правда, в своих работах он допустил ряд ошибок, некоторые из которых, впрочем, еще не были замечены, но все же научная ценность его работ весьма велика. Между тем его имя несправедливо забыто.

Особенно значительны работы Купфера в области географии, где он впервые разработал методику измерения углов в кристаллах и дал ряд расчетных ме-

тодов в области геофизики. Купфер особенно прославился своими исследованиями земного магнитного поля, нача-

тыми по инициативе Гумбольдта, и частично, проведенными в сотрудничестве с Араго и с известным русским ученым Э. Х. Ленцом. Купфер был создателем русской сети магнитных обсерваторий и крупным метрологом.

В области метрологии Купфер создал платиновые прототипы русского фунта и сажени и провел точные сравнения этих мер с иностранными. При этом Купфер построил точные компараторы, особой конструкции держатели для эталонов, и во многом улучшил технику взвешивания.

Общим дефектом работ Купфера было некоторое злоупотребление методом наименьших квадратов, которое, по видимому, усложняло его современникам.

В своем докладе член-корр. АН СССР Т. П. Кравец сообщил, что им закончено редактирование II-го тома «Экспериментальных исследований по электричеству» Фарадея. Во второй том включены более ранние работы Фарадея (с 1821 по 1844 гг.): исследования электрического течения, вопросы о природе электрического возбуждения, результаты изучения паровой электрической машины Армстронга. Изучение работы этой машины привело Фарадея к выводу, что тела электризуются пропорционально их диэлектрической постоянной.

Затем докладчик остановился на статье Фарадея 1821 г., посвященной открытию электромагнитного вращения. Статья эта интересна в связи с тем, что Ампер, прочитав ее, пришел к заключению, что Фарадей является выдающимся ученым. Так, Гильберт писал по этому поводу: «Г-н Ампер по поводу этой работы неоднократно называет Фарадея великим физиком. Рассмотрев его работу в целом, я должен согласиться с этим суждением».

При переводе этой статьи Фарадея пришлось столкнуться с большими трудностями. Не говоря уже о том, что терминология Фарадея совершенно иная, нежели та, которой мы пользуемся в настоящее время (например, заряд Фарадей вызывает силой), самое изложение статьи очень трудно для понимания, а некоторые суждения Фарадея вызывают просто недоумение, которое, однако, тотчас же разъясняется, если вспомнить, что статья эта была написана в 1821 г., за 5 лет до открытия Ома своего закона.

Второй том «Экспериментальных исследований по электричеству» заканчивается рядом статей Фарадея, носящих полемический характер. Общий объем тома, включая библиографию, составит 30 печ. л.

М. И. РАДОВСКИЙ



Обсуждение книги по автоматизации электропривода

10 октября 1950 г. на читательской конференции, организованной Секцией промэлектротехники МОНИТОЭ и инженера и техника им. Дзержинского, обсуждалась книга А. Б. Челюсткина и Е. А. Розенмана «Автоматическое управление прокатными станами». В обсуждении приняли участие работники Института механики и телемеханики Академии наук СССР, вузов, Министерства металлургической промышленности, треста «Электромонтаж», треста «Центроэлектромонтаж» МСПТИ, Ленинградского научно-технического издательства литературы по черной и цветной металлургии и др.

На конференции был заслушан отзыв о книге на конференции секции техн. наук Л. Б. Гейлера (трест «Электропривод»). Затем состоялся обмен мнениями.

Б. А. Левитанский (Главэнерго ММП), отметил, что при перенесении, в книгу необходимо включить

рецензию, напечатанную в настоящем номере журнала,

вопросы ионного привода, нашедшего практическое применение в металлургической промышленности.

Кандидат техн. наук О. В. Слежановский (трест «Электропривод») отметил, что в книге недостаточно отражен опыт ряда проектных организаций; глава вторая по теории автоматического регулирования излишня для данной книги; инженерные методы расчета даны недостаточно подробно (развитие переходных процессов в функции из-за переключения, влияние различных параметров на переходные процессы и т. д.), стабилизирующим трансформаторам уделено лишь 3—4 стр., не дан выбор коэффициента трансформации, постоянных времени.

Инж. В. И. Фейгин (ЦЛА ММП) сообщил, что многие заводы дали этой книге положительную оценку (Запорожсталь, Днепродзержинск, Никополь). В книге дано четкое описание процессов и действия схем автоматического управления. Материал изложен в доступной форме.

Инж. С. М. Лившиц (МПКУ треста «Центроэлектромонтаж») отметил, что тираж книги недостаточен. Для ясности содержания необходимо было дать примеры.

Следует особенно отметить вопросы применения переменного тока для крановых и вспомогательных механизмов. Серийные и компаундные электродвигатели не применяются для вспомогательных механизмов. В книге не отражены вопросы экономики.

Кандидат техн. наук, доц. Я. В. Мильман (Московский текстильный институт) подчеркнул, что первые три главы книги весьма ценны и могут быть использованы в любой отрасли промышленности. Иллюстрация ряда положений примерами была бы весьма желательна. В целом книга заслуживает высокой оценки.

Кандидат техн. наук А. Я. Лернер (ИАТ Академии наук СССР) указал, что глава вторая весьма нужна и связана с последующими главами. Теория автоматического управления по некоторым вопросам еще не разработана, особенно для систем, описываемых дифференциальными уравнениями высокого порядка. Особенностью данной книги является то, что она отражает опыт авторов; все приведенные схемы проверены на практике; в книге не мало практических примеров.

Инж. А. А. Тайц (председатель секции промэлектротехники МОНИТОЭ) назвал книгу полезной. Глава вторая, охватывающая вопросы структуры, звеньев, переходных процессов, критерия устойчивости, точности регулирования, — необходима, и определения, приводимые в этой главе, используются в последующих главах. Вопросы магнитных усилителей и электроники в книге охвачены недостаточно. Не даны преимущества и недостатки, а также области применения различных систем торможения

(динамического, противовключением). Отсутствуют форсировки возбуждения синхронных двигателей, упрощенных регуляторов скольжения. Вкрайне поражен опыт треста «Электропривод», в особенности по автоматическому управлению электроприводом холодной прокатки. Книга издана и оформлена хорошо.

На конференции выступил студент МЭИ 5-го курса, А. А. Петровский, специализирующийся по электроприводу. Он отметил, что книга в значительной степени облегчила изучение вопросов автоматического управления и дипломное проектирование для студентов, специализирующихся в области электропривода.

В заключение авторы — А. Б. Челюсткин и Е. А. Зенман — обратили внимание участников конференции на трудности, возникшие при составлении рукописи с ограниченным объемом. Некоторые вопросы к составлению рукописи были недостаточно разработаны по ним не было достаточного опыта (по магнитным тентам, ионному электроприводу и т. п.). В следующем издании книги авторы учтут высказанные пожелания и сделают необходимые дополнения. Авторы выражают благодарность за состоявшееся обсуждение и за ряд замечаний.

Конференция приняла решение, в котором на желательность опубликования материала конференции в журнале «Электричество».

Инженер А. А.



Научно-техническая сессия по электроприводу металлорежущих станков

Всесоюзное научное инженерно-техническое общество энергетиков (секция электропривода и промэлектроборудования) провело в ноябре 1950 г. в Ленинграде научно-техническую сессию по электроприводу металлорежущих станков.

Задачами сессии являлись: обобщение опыта проектирования и эксплуатации электроприводов металлорежущих станков, выявление новых требований к электроприводам в связи с применением инструмента из твердых сплавов и повышением скоростей резания, установление основных технических направлений при дальнейшем совершенствовании электрооборудования станков. В основном внимание делегатов было сосредоточено вокруг вопросов привода тяжелых станков.

В работе сессии приняли участие 117 делегатов от 43 городов СССР. Большинство делегатов было командировано промышленными предприятиями, преимущественно станкостроительными и машиностроительными заводами.

На сессии было заслушано 16 докладов.

От Техуправления Министерства станкостроения СССР с докладом «Техническая политика и ближайшие задачи в развитии отечественного станкостроения» выступил инж. П. Г. Выдрин. Отметив большие достижения станкостроительной промышленности СССР, особенно в области тяжелых станков, докладчик указал на две характерные особенности современного станкостроения: 1) значительное повышение скоростей резания в связи с применением инструмента из твердых сплавов и стахановскими методами работы; 2) широкое внедрение автоматизации в универсальных станках с значительным увеличением выпуска специальных станков автоматов и полуавтоматов, изготовлением ряда станочных линий и пуском первого в мире автоматического завода автомобильных поршней. Докладчик перечислил основные задачи, стоящие перед станкостроением, и указал на необходимость создания ряда уникальных тяжелых станков. Особое внимание должно быть уделено упрощению перена-

ладки станков автоматов для возможности их применения в мелкосерийном производстве и автоматизации вспомогательных операций. В области привода были проделаны работы по совершенствованию непрерывного управления, обеспечивающих возможность плавного изменения скорости и автоматического регулирования процесса резания и по упрощению схем автоматического управления станочными линиями.

Общие вопросы электропривода металлорежущих станков были освещены в докладах канд. техн. В. П. Андреева (ЛПИ) и инж. И. Л. Шапиро («Электропривод»). В. П. Андреев в докладе «Современные электроприводы металлорежущих станков» указал, что основным типом привода станков является регулируемый скоростью привод с асинхронным двигателем с использованием различных электромагнитных усилителей. Наряду с электромагнитным усилителем распространение получил электромагнитный усилитель с возбуждением, который может быть выполнен с нормальной машины постоянного тока. В области перспектив перспективным является ионный привод постоянного тока. Для универсальных станков перспективно применение приводов переменного тока с первой очередь приводов с асинхронным двигателем с рекуперацией обмотки на различное число пар полюсов.

Инж. И. Л. Шапиро в докладе «Современные электроприводы крупных станков» в основном остановился на приводах тяжелых станков: токарных, расточных, строгальных, разработанных трестом «Электропривод».

Три доклада были посвящены вопросам непрерывного управления электроприводами. Канд. техн. наук, Дранников (ЛПИ) в докладе «Непрерывное управление электроприводами металлорежущих станков» сопоставил различные системы управления с электромагнитным управлением.

Доклад инж. П. В. Маркина (Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков) «Бесступенчатый электронно-ионный привод металлорежущих станков» был посвященному приводу постоянного тока типа ЭЛИР, разработанному ЭНИМС и выпускаемому заводом низковольтной аппаратуры Министерства станкостроения.

Инж. М. Е. Верхолат (Станкостроительный завод им. Сталина) в докладе «Электрический привод станков с широким диапазоном регулирования скорости» сообщил о разработанном на заводе электроприводе, который обеспечивает диапазон регулирования скорости 1:400, с возможностью доведения его до 2000. Значительное расширение пределов регулирования скорости в основном достигнуто за счет введения жесткой связи по скорости от тахогенератора.

В трех докладах рассматривались вопросы привода различных видов станков. Инж. М. А. Бухбиндер (трест «Электропривод») в докладе «Электропривод токарно-винторезных и карусельных станков» указал, что основным типом привода тяжелых токарных карусельных станков следует считать привод с регулируемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения. В отдельных случаях может быть эффективным применение системы генератор—двигатель с электромашинами-усилителями. Для привода подачи суппортов, предназначенных для осуществления только токарных работ, может быть рекомендована система генератор—двигатель. В случае, когда станок предназначается также и для винторезных работ, а замен механической связи между шпинделем и суппортом посредством ходового винта может быть использована чисто электрическая связь типа электро-го вала или следящего привода.

Инж. А. П. Зуев (трест «Электропривод») в докладе «Электропривод продольно-строгальных станков» отметил, что наиболее рациональным приводом продольно-строгальных станков является привод по типу генератор—двигатель, причем регулирование скорости целесообразно осуществлять только за счет изменения напряжения генератора; в этом случае сокращаются длительности переходных процессов и уменьшаются потери в силовой цепи. Применение электромашинных усилителей позволяет значительно расширить диапазон регулирования скорости, обеспечить большую жесткость механических характеристик привода, сократить длительность разгона и торможения стола. Наиболее эффективной является замена привода с электромашинным усилителем с полупроводниковым. Ее применение целесообразно в станках с большой длиной стола, где особенно существенно сокращение времени реверса.

В докладе канд. техн. наук Т. Н. Соколовой (ЛПИ) по вопросу выбора электромеханической системы управления процессами копирования на металлорежущих станках были рассмотрены различные системы копирования и указаны свои недостатки. В итоге сопоставления ряда схем показаны пути обеспечения наименьших погрешностей систем.

Инж. А. П. Гришин (Главстанкосмежпром) в представлении доклада «Электрическая аппаратура станкосмежпрома МСС» сообщил о номенклатуре электроизделий, выпускаемых заводами Главстанкосмежпрома в настоящее время и о намеченной новой номенклатуре на 1951 г.

В докладах касались отдельных систем приводов станков. Доктор техн. наук Л. Б. Гейлер (трест «Электропривод») в докладе «Электрический вал на переменном токе» сообщил о работах, проведенных в тресте «Электропривод» по исследованию электрического вала, предназначенных для замены механических связей между шпинделем и суппортом в токарно-винторезных станках. Во втором своем докладе «Изменение асинхронных короткозамкнутых электродвигателей с повышенным скольжением для приводов металлорежущих станков» Л. Б. Гейлер рассмотрел характерные особенности этих двигателей и указал область их применения. Двигатели с повышенным скольжением являются наиболее подходящим типом приводного двигателя для станков, характеризующихся преобладанием переходных процессов и электрифицируемых полностью на переменном токе.

Докладчик ознакомил делегатов с новыми сериями АС и АОС двигателей с повышенным скольжением, выпускаемыми на базе единых серий асинхронных двигателей А и АО.

Инж. А. М. Харитонов (Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков) в докладе «Многоскоростные электродвигатели и их применение в станкостроении» показал, что однообмоточные многоскоростные асинхронные электродвигатели, имея увеличенное против двухобмоточных число выводов от обмотки, обладают по сравнению с последними рядом преимуществ. Для обеспечения потребностей станкостроения на базе 4, 5 и 6-го габаритов единой серии синхронных двигателей АО ЭНИМС была разработана серия многоскоростных однообмоточных двигателей Т, которая пущена в серийное производство на одном из заводов Министерства станкостроения. Оригинальные советские схемы обмоток многоскоростных электродвигателей имеют меньшее число выводов от обмотки и позволяют обходиться более простым переключателем для пересоединения секций, чем известные заграничные схемы.

Во втором своем докладе «Высокоскоростные электродвигатели в станкостроении» А. М. Харитонов сообщил об успехах ЭНИМС в создании асинхронных двигателей повышенной частоты, необходимых для ряда отраслей промышленности. Использование аэродинамических опор открывает перспективы для повышения скоростей до 150 000 об/мин.

Инж. Э. Б. Рогачев (ЭНИМС) выступил с докладом «Электромагнитные многодисковые фрикционные муфты». Большим достоинством многодисковой фрикционной муфты является малое время срабатывания и допустимость большого числа включений. ЭНИМС разработана серия муфт с передаваемым моментом до 30 кг.

Вопросам эксплуатации был посвящен доклад канд. техн. наук М. И. Трехова (ЗИС) «Опыт эксплуатации электроприводов металлорежущих станков на Московском автозаводе им. Сталина». Три основных требования предъявляются к электроприводу и электрооборудованию металлорежущих станков: 1) удовлетворение потребностей технологического процесса обработки резанием и обеспечение необходимой производительности; 2) простота и надежность; 3) экономичность. Дальнейшее увеличение производительности станков может быть достигнуто в основном за счет сокращения немашинного времени, путем автоматизации закрепления деталей, измерения их размеров и других вспомогательных операций. Для повышения надежности электрооборудования необходимо упрощение схем управления станками, уменьшение числа аппаратов и контактов, входящих в схему, и совершенствование самой аппаратуры. Вопросам к. п. д. станков и их энергетическому балансу до сих пор почти не уделялось внимания. Вследствие несовершенства кинематики некоторые станки имеют к. п. д. технологического процесса, т. е. отношение полезной работы резания к расходу электроэнергии на обработку детали, ниже 10%. Повышение скоростей резания в ряде случаев вследствие возрастания потерь холостого хода и нагрузочных привело к еще большему понижению к. п. д. При проектировании станков необходимо стремиться к повышению их энергетических показателей.

Заслушанные доклады вызвали широкий обмен мнениями. В прениях выступило 29 делегатов. Наибольший интерес участников сессии вызвали вопросы: выбора рода тока и типа привода, непрерывного управления, номенклатуры и качества выпускаемой аппаратуры. Большинство предложений, внесенных по этим вопросам, нашло отражение в резолюции.

Много внимания было уделено вопросам экономики при выборе типа привода. При этом указывалось, что основным моментом при оценке экономической эффективности привода является его влияние на производительность станка.

В прениях указывалось, между прочим, на необходимость введения промышленных эксплуатационных испытаний станков и их электрооборудования заводами-изготовителями для своевременной проверки принятых при проектировании решений и учета результатов испытаний при последующих разработках.

В ряде выступлений высказывались пожелания усилить работу по обмену опытом в области проектирования, наладки и эксплуатации станочного электрооборудования. Отмечались существенные недостатки имеющейся литературы по электроприводу и автоматическому регулированию и, в частности, отсутствие в ней инженерных методов расчета систем непрерывного управления и регулирования.

Следует отметить инициативу Киевского отделения ВНИТОЭ, которое предварительно провело в Киеве местное совещание по электрооборудованию станков и затем внесло ряд предложений, выдвинутых киевскими энергетиками.

В решениях сессия отметила, что для большинства массовых станков общего назначения основным видом привода остается привод с короткозамкнутым асинхронным двигателем. Сессия рекомендовала более широкое использование многоскоростных двигателей совместно с механическими вариаторами или другими средствами бесступенчатого регулирования скорости. Для привода тяжелых станков прогрессивным и рациональным является применение: 1) систем глубокого регулирования скорости как для главных, так и для вспомогательных механизмов станков; 2) методов непрерывного управления с использованием различного рода электромашинных усилителей; 3) электрических систем синхронного и несинхронного слежения, дающих возможность путем замены механических связей электрическими упростить конструкцию станка. Однако при выборе типа привода в каждом случае необходим индивидуальный подход и применение регулируемых приводов постоянного тока должно быть оправдано упрощением станка, повышением его производительности, упрощением обслуживания.

Сессия указала на необходимость дальнейшей углубленной экспериментальной и теоретической работы по изучению существующих систем станочных электроприводов и по проектированию новых. Сессия рекомендовала: 1) проведение сравнительного анализа современных схем непрерывного управления с различными типами электромашинных усилителей, выявление преимуществ одних систем перед другими и определение областей их применения; 2) разработку рациональной структуры схем непрерывного управления для наиболее типичных приводов; 3) усиление работы по теоретическому изучению и анализу современных систем электроприводов, на базе которой должны быть созданы упрощенные методы расчета сложных систем электроприводов.

При этом было обращено внимание на необходимость упрощения установок автоматизации электропривода с целью обеспечения высокой эксплуатационной надежности.

Сессия нашла своевременным усилить внимание к вопросам разработки методов плавного регулирования скорости двигателей переменного тока.

Сессия подчеркнула необходимость усиления при проектировании вопросов экономической эффективности приводов и отметила, что выбор окончательного варианта электропривода может быть произведен с учетом экономических показателей по первоначальным и эксплуатационным затратам.

Сессия особо отметила исключительную важность неотложности создания единой научно-обоснованной терминологии в области электропривода, автоматического управления и регулирования и единой системы условных обозначений для принципиальных схем промышленных автоматов.

Сессия обратила внимание министерств электропромышленности и станкостроения на необходимость живления серийного выпуска ряда новых изделий.

Сессия обратила внимание МЭП и МСП на необходимость скорейшего выпуска каталогов и справочников содержащих полный объем технических характеристик необходимых при проектировании электроприводов.

Ввиду важности широкого освещения вопросов электропривода в периодической печати и усиления опыта по проектированию, наладке и эксплуатации электроприводов металлорежущих станков, сессия выразила пожелание об организации специального журнала «Электропривод» и о создании в журнале «Станки и инструмент» постоянного отдела по электрооборудованию станков.

В связи с внедрением различного рода сложных электроприводов станков сессия указала на необходимость усиления работы по повышению квалификации среднего технического персонала машиностроительных заводов и цехов, обслуживающих электрооборудование станков, чем наряду с организацией кружков и курсов сессия рекомендовала издание популярной технической литературы по электроприводу станков.

*Кандидат техн. наук В. П. АНДРЕЕВ
Кандидат техн. наук Ю. А. САВИН*



Совещание по газоочистке

В октябре 1950 г. в Москве состоялось межведомственное совещание по координации научно-исследовательских работ в области очистки промышленных выбросов. Совещание было организовано Государственной санитарной инспекцией СССР и трестом «Газоочистка» (МХП).

В совещании приняли участие около 300 делегатов, представлявших 50 научно-технических организаций, общественных и партийные организации и органы Государственной санитарной инспекции.

С вступительным словом на совещании выступил заместитель министра здравоохранения — главный государственный санитарный инспектор Союза ССР Т. Е. Болдырев, который подчеркнул значение работ по газоочистке в свете изданного в 1949 г. постановления правительства «О мерах борьбы с загрязнением атмосферного воздуха и улучшения санитарно-гигиенических условий населенных мест». Во исполнение этого постановления по народнохозяйственному плану отпускаются крупные средства на строительство газоочистных и пылеулавливающих установок на крупнейших предприятиях и электростанциях. Значительное количество таких установок уже сооружено и сдано в эксплуатацию. В 34 высших технических учебных заведениях СССР (энергетических и горно-металлургических) в учебные программы включены вопросы газоочистки и пылеулавливания. Вопросы координации науч-

но-исследовательских работ в области очистки промышленных выбросов в настоящее время приобретают особое значение.

Инж. М. Ф. Скачко (трест «Газоочистка» МХП)ступил с докладом «Ближайшие задачи в области очистки газов и пути их решения». «Газоочистка» более чем за 20 лет своего существования разработал много методов очистки различных газов, издал большое число конструкций газоочистных аппаратов. Отечественные конструкции наиболее эффективных очистных аппаратов-электрофильтров работают в химической, металлургической, бумажной промышленности, электростанциях, в промышленности строительных материалов и в других отраслях народного хозяйства. Типы советских электрофильтров, как, например, СГ для улавливания сажи, ДМ — для очистки доменных газов, СМ — для очистки генераторного и коксового газа, и М — для очистки газов в химической промышленности получили всеобщее признание, как лучшие газоочистные аппараты из всех известных аппаратов отечественной и зарубежной техники. Трестом разработаны и применены комбинированные двухступенчатые аппараты, состоящие из батарейных циклов и электрофильтров с карманами электродами, сконструированными в одном корпусе. Коэффициент полезного действия таких аппаратов 97—98%.

тотал способ полной очистки дымовых газов от сернистого газа. Первая такая установка строится одной из московских электростанций. Она будет из дымовых газов товарную продукцию — жидкий газ и сульфат аммония. Дымовая труба этой установки окажется излишней. Разработан новый электрический аппарат для тонкой очистки РИОН-С-28. В отличие от обычных электрофилов этот аппарат процессы зарядки пыли и осаждения. Аппарат отличается малыми габаритными размерами и небольшим расходом электроэнергии на очистку. В. Алексашенков (НИИОГАЗ) доложил о научных исследованиях работ Н И И О Г А З части санитарной очистки газов. Наиболее эффективным способом устранения загрязнения атмосферы является ликвидация самих выбросов и их возникновения путем проведения технологических мероприятий. Институт изучает ряд теоретических вопросов электрической очистки газов. Из крупных работ, выполненных институтом, можно отметить: а) влияние формы электродов на эффективность очистки; б) зависимость эффективности очистки от размеров электродов; в) электрическая очистка газов двигателей внутреннего сгорания и др. Б. Л. Шнеерсон выступил с докладом о доминирующей роли в области газоочистки в металлургической промышленности. Проф. Л. К. (МЭИ им. Молотова) сообщил о результатах исследования золоуловителей — мультициклона и машинного вращения ротором, обеспечивающих высокий уровень обеспыливания газов, доходящий до 98%. Доц. (ВЗЭИ) остановился на вопросах передачи

тепла на большие расстояния, открывающего возможность вывода предприятий, загрязняющих атмосферный воздух, из городов. Доц. М. П. Калинушкин (Строительный институт Моссовета) сообщил о работах по очистке газов в установках городского хозяйства. Разработан золоуловитель для передвижных снегоотвалов, создано несколько контрольно-измерительных приборов и разработана методика пылевых измерений. Инж. И. С. Розенкранц (НИИУИФ) сообщил о работах в области инерционного метода обеспыливания промышленных газов. Модель разработанного институтом аппарата улавливает пыль размером до 1 микрона. Е. В. Рекк (ВНИИСТО) познакомил собравшихся с конструкцией ячейковых фильтров, состоящих из стальных гофрированных сеток, комбинированных в пакет и заключенных в коробку; эти аппараты могут быть с успехом применены для тонкой очистки воздуха. Кандидат техн. наук Н. И. Зверев (ВТИ) сообщил о двух типах золоуловителей (жалюзийном и центробежном скруббере), применяющихся в настоящее время для очистки дымовых газов котельных и электростанций от золы. Канд. техн. наук Е. Ф. Кирпичев (ЦКТИ) в своем выступлении выразил пожелание о координации научно-исследовательских работ в области газоочистки. С сообщениями о проводимых научно-исследовательских и проектных работах выступили также канд. техн. наук Б. А. Петров (Гипроцемент), инж. И. В. Голицын (ГИГХС), инж. Д. С. Гликин (Гипроалюминий) и др.

Совещание приняло резолюцию, в которой намечены практические мероприятия по координации работ в области очистки газов. Создана постоянная действующая комиссия по координации работ, в которую вошли представители организаций, занимающихся вопросами очистки газов.

Инж. В. Н. УЖОВ:



Совещание по вопросам строительства сельских электростанций

Инициативе Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетиков в конце декабря 1950 г. было проведено межреспубликанское научно-техническое совещание по вопросам строительства сельских электростанций, на котором были широко представлены представители организаций Белоруссии и Латвии, связанные с выполнением работ по строительству сельских электростанций.

В совещании приняли участие секретарь ЦК КП(б)Б Белоруссии, заместители председателя Совета Министров В. Г. Кудряев и И. Л. Черный, министр сельского хозяйства БССР С. С. Костюк и др.

Вступительным словом И. Л. Черный охарактеризовал современное положение сельской электрификации, основные вопросы развития сельской электрификации в Белорусской ССР и остановился на практических задачах по развитию строительства сельских гидроэлектростанций, в частности, путем применения индустриальных методов производства работ, всемерного использования местных энергетических ресурсов и др.

В совещании были заслушаны доклады: инж. А. М. (Главсельэлектро МСХ СССР) о технических вопросах развития сельской электрификации, инж. М. Г. (Белорусский строительный-монтажный трест Главсельэлектро) об опыте и путях развития строительства сельских гидроэлектростанций в Белорусской ССР, инж. Г. Б. (Главэнергоуправление БССР) о тепловых электростанциях и теплофикации в сельском хозяйстве, доктора техн. наук Н. А. Сазонова (Всесоюзный институт электрификации сельского хозяйства) об основных принципах составления схем энергетического использования местных энергетических ресурсов на примере схем Белорусской ССР; инж. А. И. Тюльпанова (Сектор

водного хозяйства Госплана БССР) о гидроэнергетических ресурсах БССР и их использовании; инж. С. А. Константинова (Госплан ЛатССР) о схеме использования местных энергетических ресурсов Латвийской ССР; инж. В. Я. Видека о гидроэнергетических ресурсах Латвийской ССР; инж. К. В. Иванова (Белорусский государственный проектный институт) о применении сборного бетона в гидротехнических и инженерных сооружениях; инж. А. П. Златковского (ВИЭСХ) о современных методах проектирования электрической части сельских электростанций и кандидата техн. наук И. М. Лившица (Белорусский политехнический институт) о современных методах гидрологических расчетов при проектировании сельских гидроэлектростанций.

При обсуждении докладов были выдвинуты различные вопросы строительства сельских тэц, в частности, о применении индустриальных методов в строительстве гидротехнических сооружений сельских тэц, о строительстве крупных тепло- и гидроэлектростанций для электрификации сельского хозяйства и др. Выступавшие уделяли внимание вопросам комплексного использования гидроэнергетических и топливных ресурсов Белорусской ССР и Латвийской ССР.

В результате обмена мнениями совещание приняло развернутую резолюцию, в которой отражены очередные задачи сельских электрификаторов в области проектирования и строительства сельских электростанций.

Совещание признало безусловно необходимым при строительстве сельских электростанций уделять особое внимание комплексному использованию местных энергоресурсов: при использовании энергии рек разрешать вопросы водного транспорта, мелиорации, хозяйственного ис-

пользования образуемых водоемов, вопросы санитарной гидротехники и др.; при использовании местного топлива — торфа — учитывать потребность в теплофикации объектов сельского хозяйства, возможность использования торфа как энергохимического сырья и др.

Совещание отметило, что несмотря на достаточно большие запасы местных энергетических ресурсов степень их использования пока еще очень мала. Темпы строительства сельских гидроэлектростанций остаются пока весьма медленными. К основным причинам такого положения совещание отнесло: низкий процент механизации трудоемких работ на строительстве гЭС, недостаточное оснащение строек строительным оборудованием, неудовлетворительное использование имеющегося оборудования и механизмов, сезонность в проведении строительных работ, пренебрежение индустриальными методами в строительстве сельских гидротехнических сооружений, недостаток в квалифицированных кадрах строительных рабочих в сельском гидростроительстве, отсутствие в проектах до-

статочно подробных разработок организации строительных работ и др.

Совещание отметило необходимость осуществления в 1951 г. опытного строительства на одной из гЭС с применением сборного бетона по методу инж. Иванова.

Учитывая большое значение для развития электрификации малых энергосистем, совещание считает целесообразным проведение соответствующих исследовательских и экспериментальных работ с целью определения наиболее рационального типа малой электростанции.

Участники совещания послали товарищу Сталину ответное письмо.

Инж. А. П. ТЮЛЕНКО

Председатель гидроэлектрической
Белорусского отделения



Валентин Петрович Вологдин

К 70-летию со дня рождения

Валентин Петрович Вологдин родился 23 марта 1881 г. в Молотовской области в семье горного смотрителя. В 1900 г. Валентин Петрович окончил Пермское реальное училище. Высшее образование В. П. Вологдин получил в Петербурге, окончив с отличием Технологический институт в 1907 г.

Трудовая деятельность Валентина Петровича началась еще до окончания училища. Во время пребывания в Технологическом институте Валентин Петрович, проживая на территории завода, работал обмотчиком электрических машин, принимал участие в статочных испытаниях судовых машин и построенных на заводе кораблей.

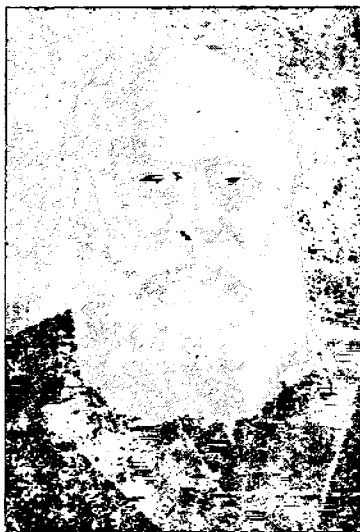
Валентин Петрович принимал активное участие в революционном движении студенчества, участвуя в политических демонстрациях, руководя рабочими и студенческими кружками. За участие в революционном движении студенчества Валентин Петрович трижды арестовывался, сидел в тюрьме и ссылался.

Еще в последних классах реального училища и позднее, будучи студентом, Валентин Петрович увлекался опытами и работами изобретателя радио А. С. Попова. Эта тяга к экспериментальным работам в области техники токов высокой частоты осталась у Валентина Петровича навсегда.

Стремление Валентина Петровича к практической заводской деятельности сказалось в том, что по окончании института, несмотря на предложение остаться для подготовки к званию профессора, он поступил на электромеханический завод Глебова, где занялся работами по созданию машин повышенной частоты. К 1909 г. В. П. Вологдиным был разработан и осуществлен генератор с частотой 1000 гц, а в следующем году — на 60 тыс. гц. Разработанные и изготовленные Вологдиным машинные генераторы повышенной частоты производились и после Великой Октябрьской социалистической революции в известных сериях типов ОП и ОПР.

В 1921 г. В. П. Вологдиным была построена мощная Октябрьская радиостанция с машинными генераторами высокой частоты. Эта радиостанция поддерживала радиосвязь в течение более 12 лет.

В работах В. П. Вологдина были успешно преодолены технические трудности, связанные с охлаждением машин, обеспечением устойчивости частоты, были даны ори-



гинальные решения вопросов при больших скоростях вращения. Генераторы высокой частоты продолжали совершенствоваться В. П. Вологдиным и позднее, вплоть до 1930 г.

О значимости работ В. П. Вологдина акад. А. И. Берг сообщал следующее: «...Вслед за этим была построена машина высокой частоты, одна из всех машин высокой частоты в мире. Мне пришлось в 1929 г. в Париже разговаривать с крупным специалистом и автором другого типа высокочастотной машины — проф. Андерсеном. В беседе со мной проф. Андерсен, узнав, что я русский, сообщил мне известные ему достижения русской электротехники и в связи с этим, в свою очередь, машину высокой частоты В. П. Вологдина. Он считал эту машину, автором которой являлся...».

Деятельность Валентина Петровича особенно широко развернулась после Октябрьской социалистической

революции. Имя Валентина Петровича тесно связано с деятельностью Нижегородской радиолaborатории со дня ее основания в декабре 1918 г. В 1922 г. работа Валентина Петровича в Нижегородской радиолaborатории была высоко оценена В. И. Лениным.

В Нижегородской радиолaborатории Валентин Петрович создал высоковольтный ртутный выпрямитель. Вместе со своими учениками он разработал серию ртутных выпрямителей на различные напряжения. В 1925 г. мощный радиоцентр был построен металлический выпрямитель мощностью 1000 квт и напряжением 12000 в.

Одновременно с постройкой генераторов высокой частоты и ртутных выпрямителей Валентин Петрович создает теорию работы ионных выпрямителей наряду со сглаживающим фильтром, теоретически обосновывает явление «псевдовакуума» в ионных выпрямителях, разработывает ряд оригинальных схем преобразования переменного тока в постоянный, в том числе известную схему каскадного напряжения.

Педагогическую деятельность Валентин Петрович начал в 1907 г. на Женских политехнических курсах, а затем в Женском политехническом институте в Петербурге. В 1921 г. Валентин Петрович был избран профессором и деканом электротехнического факультета Нижегородского государственного университета.

Начиная с 1922 г., Валентин Петрович являлся одним из директоров Треста слабых токов, руководил организацией Центральной радиолаборатории в Ленинграде и переездом заводов вакуумной промышленности на машинное производство.

В период 1928—1930 гг. Валентин Петрович проводил ряд лабораторных работ, в том числе и по исследованию нелинейных свойств сегнетовой соли для умножения частоты и по применению титанатов для получения электриков с большими диэлектрическими постоянными. Особенно велики заслуги В. П. Вологодина в области промышленного применения токов высокой частоты. На базе ранее разработанных машин высокой частоты Валентин Петрович разрабатывает и внедряет в промышленность индукционные печи, используемые для выплавки цветных металлов. В конце 20-х годов им были начаты работы по использованию токов высокой частоты для термической обработки металлов, а в 1935 г. он помог организовать на автозаводе им. Сталина высокочастотной закалки коленчатых валов. Этим самым за СССР был задан приоритет в вопросе промышленного применения токов высокой частоты. Валентин Петрович стал руководителем большой школы специалистов, работающих в этом направлении.

В период 1940—1946 гг. Валентин Петрович разрабатывает и внедряет в промышленность методы пайки твердых припоев, метод сварки токами высокой частоты, руководил разработками станков-автоматов и приспособлений для применения токов высокой частоты, разрабатывал теорию индукционного нагрева металла. Одновременно с проведением большой научно-технической работы Валентин Петрович продолжал свою педагогическую деятельность, будучи профессором Ленинградского электротехнического института им. Ульянова-Ленина.

Валентину Петровичу принадлежит свыше 100 изобретений, оформленных авторскими заявками и патентами. Им написано несколько научных книг по вопросам техники выпрямления тока и по индукционному нагреву металлов и более 100 научно-технических статей. Валентин Петрович прочитал более 250 обзорных публичных лекций. Валентин Петрович принимает активное участие в работе Научно-технического общества радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова.

Деятельность В. П. Вологодина достойно оценена: в 1937 г. ему была присуждена степень доктора технических наук без защиты диссертации; в 1939 г. он был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. Валентину Петровичу была присуждена Сталинская премия, присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники; присуждена первая золотая медаль им. А. С. Попова.

За выдающиеся заслуги в области создания, развития и внедрения в промышленность высокочастотной электротехники и термической обработки металлов токами высокой частоты и проявленные при этом инициативу и настойчивость Валентин Петрович в 1944 г. был награжден орденом Ленина.

Таков итог плодотворный полувековой трудовой деятельности на благо народа одного из новаторов советской электротехники В. П. Вологодина.

**С. А. РИНКЕВИЧ, П. В. ШМАКОВ, С. Я. СОКОЛОВ,
Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ, Н. П. ЕРМОЛИН, А. А. ФОГЕЛЬ,
Е. А. СЛУХОЦКИЙ, В. Ю. РОГИНСКИЙ**

*Ленинградский электротехнический институт
им. Ульянова (Ленина) и Ленинградское отделение
ВНОРиЭ им. А. С. Попова*



О конкурсах на соискание премий Академии наук СССР в 1951 году

В 1951 г. будут проведены конкурсы на соискание следующих премий Академии наук СССР:

1. Премия имени Н. Д. Папалекси в размере 20 000 рублей за лучшую работу по физике.

2. Премия имени П. Л. Чебышева в размере 20 000 рублей за лучшую работу в области математики.

Срок представления работ на соискание премии до 1 октября 1951 г.

Премии присуждаются Президиумом Академии наук СССР по конкурсу советских граждан, их авторским коллективам и советским научным учреждениям. Работы на соискание перечисленных премий могут представляться научными обществами, научно-исследовательскими институтами, высшими учебными заведениями, ведомствами, общественными организациями и отдельными лицами. Работы на соискание премий представляются на русском языке в трех экземплярах, напечатанных на пишущей машинке или типографским способом, с надписью: „На соискание премии имени“

При работах, представляемых на соискание премий, должны быть приложены авторефераты и краткие биографические данные об авторе с перечнем его основных научных работ и изобретений.

Присуждение премий состоится в конце 1951 года.

В 1951 г. по конкурсу, объявленному в 1948 г., будут присуждены две премии имени великого русского ученого Н. И. Лобачевского за лучшие сочинения по геометрии (преимущественно неевклидовой).

Размер премий: 25 000 рублей и 15 000 рублей.

Работы на соискание премий направлять в Отделение физико-математических наук Академии наук СССР (Москва, 56, Б. Грузинская, 10).

**Отделение физико-математических наук
Академии наук СССР**

А. М. Коган

31 октября 1950 г. в возрасте 67 лет скончался Александр Михайлович Коган — один из основоположников отечественной электроламповой промышленности. Он посвятил ее созданию и развитию 38 лет своей инженерной деятельности. Значительная часть этого времени относится к его работе на Московском электроламповом заводе, первым главным инженером которого он был.

При участии Александра Михайловича прошли основные этапы развития производства ламп накаливания, начиная с организации поточного производства, механизации отделочных операций, внедрения новых технологических процессов, организации конструкторских отделов и исследовательских лабораторий. Благодаря работе коллектива советских специалистов, которым в то время руководил А. М. Коган, наша страна совершенно освободилась от импорта ламп накаливания. Последние годы своей жизни Александр Михайлович посвятил подготовке молодых специалистов и распространению научно-технических знаний. При непосредственном его участии во время Великой Отечественной войны был создан заводской техникум, давший заводам много новых специалистов, вооруженных новейшими знаниями в области электровакуумной техники. Александр Михайлович руководил учебной частью этого

техникума и был членом его Государственной квалификационной комиссии.

Работая на посту начальника бюро технической формации завода, А. М. Коган, внес в это важное много новых начинаний, содействуя этим прогрессу завода. В частности, по его инициативе было организовано издание технико-информационного бюллетеня, пользовавшегося большой известностью на предприятиях вакуумной промышленности.

Память о крупном советском специалисте А. М. Когане на многие годы сохранится среди его товарищей по работе.

Проф. Р. А. Нил

Главный инженер Электролампового завода

*Заслуженный деятель науки и техники
проф. А. П. Ив*

Зав. кафедрой МЭИ им. Мо

*Заслуженный деятель науки и техники
проф. Л. Д. Белл*

Зав. кафедрой МЭИ им. Мо



Библиография

**В. А. ВЕНИКОВ. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ. 168 стр., ц. 9 руб. Госэнергоиздат, 1949.**

Автор поставил себе целью восполнить пробел, имеющийся в технической литературе по вопросу о применении теории подобия и физического моделирования к задачам электротехники. Как известно, благодаря трудам советских ученых, во главе с акад. М. В. Кирпичевым, научно обосновавших теорию подобия и физического моделирования, последнее нашло широкое применение во многих отделах теплотехники, гидротехники и гидромеханики. Соответственно теория подобия и вообще научные основы физического моделирования достаточно хорошо известны широким кругам специалистов указанных областей. В то же время применение этой теории в области электротехники несколько задержалось, поскольку, несмотря на внедрение методов физического моделирования, теория его оставалась неосвоенной в электротехнической литературе. В большинстве случаев отдельные исследователи электротехники, прибегая к моделированию тех или иных явлений, пользовались частными соображениями. Некоторые работы (как, например, кандидатская диссертация В. В. Наумова, 1943—1944), содержащие изложение основ теории подобия и физического моделирования, остались, насколько нам известно, неопубликованными.

В книжной электротехнической литературе, едва ли не впервые — в 1949 г., мы находим краткое изложение теории подобия в книге Л. И. Гутенмахера «Электрические модели» и более подробно — в рецензируемой книге В. А. Веникова. Уместно заметить, что эти книги по своему основному содержанию совершенно различны и как бы дополняют одна другую: в то время как первая из названных книг трактует вопросы математического моделирования, вторая касается физического моделирования, основанного на теории подобия.

Но касаясь математического моделирования, заметим, что физическое моделирование в некоторых случаях является незаменимым инструментом научно-технического исследования явлений в электротехнических сооружениях. Сюда, например, относится исследование грозоопасности подстанций; исследование устойчивости и переходных процессов

сложных электроэнергетических систем. В этих подобных случаях изучение явлений математическим путем, хотя бы и с использованием тех или иных современных вычислительных средств, неизбежно будет основано на известных допущениях, проверить которые в действительности далеко не всегда возможно. Вместе с тем, хорошо известная и тщательно проверенная во всех своих деталях физическая модель сложной системы может быть достаточно надежным средством исследования; это в то время и наглядное средство, доступное любому инженеру. В физической модели законы природы, как правило, являются в тех же формах, какие свойственны оригиналу.

Таким образом, рецензируемую книгу, отвечающую назревшей потребности ознакомления широких кругов электротехников с принципами физического моделирования, следует признать своевременной и полезной. Книга является одним из пионеров физического моделирования в области электротехники и главным пионером в этой области теории подобия, составляя приоритет советских ученых: ему принадлежит большинство работ, посвященных этим вопросам.

Книга содержит, кроме предисловия, введения и приложений, пять глав основного текста, занимающих 148 страниц. В приложениях даны таблицы размерностей и критериев подобия, список обозначений, список литературы, предметный указатель. Имеется значительное число рисунков. Глава I посвящена общим и основным понятиям геометрического, физического и математического подобия; Глава II содержит изложение общих методов определения критериев подобия; III — определение критериев по отношению к частным случаям моделирования. Главы IV и V, занимающие вместе 70 страниц, т. е. почти основную часть книги, посвящены основам «динамического моделирования электроэнергетических систем». Термин «динамическое моделирование» применен как синоним физического моделирования и служит для того, чтобы подчеркнуть, что в этих случаях изучаются процессы, протекающие в реальных объектах, а не в математических моделях. В приложениях даны таблицы размерностей и критериев подобия, список обозначений, список литературы, предметный указатель. Имеется значительное число рисунков. Глава I посвящена общим и основным понятиям геометрического, физического и математического подобия; Глава II содержит изложение общих методов определения критериев подобия; III — определение критериев по отношению к частным случаям моделирования. Главы IV и V, занимающие вместе 70 страниц, т. е. почти основную часть книги, посвящены основам «динамического моделирования электроэнергетических систем». Термин «динамическое моделирование» применен как синоним физического моделирования и служит для того, чтобы подчеркнуть, что в этих случаях изучаются процессы, протекающие в реальных объектах, а не в математических моделях.

помощи вращающихся машин, от так называемых «сетей», в которых электрические машины заменяются эквивалентными индуктивно-активными сопротивлениями. Глава IV содержит изложение общих принципов управления электроэнергетических систем, а V — описание элементов конкретной, выполненной автором, модели установки.

Таким образом читатель найдет в книге достаточный материал, чтобы ознакомиться с принципами, а частью — деталями вопроса о применении физического моделирования в различных отделах электротехники. К сожалению вследствие весьма скромного объема книги многие вопросы моделирования автор вынужден был касаться вкратце. Вероятно, этим и объясняется известный отрывочность и даже местами поверхностность в изложении некоторых разделов книги. Так, например, в начале раздела е), § 3, 2. главы III обещано рассмотреть волновых процессов в асинхронной машине. Однако рассмотрен только частный пример о пересчете частотной характеристики; это, конечно, далеко отщипывает вопроса о волновых процессах в обмотке. Едва ли также удовлетворит читателя несколько строк изложение моделирования процессов газового разряда (стр. 63—65). Здесь некоторые места довольно трудно понять, они грешат рядом неточностей и это не способствует популяризации предмета. Например, на одной из страниц (64) утверждается, что плотность тока обратно пропорциональна квадрату линейных размеров, с другой стороны, допускается, что плотность тока обратно пропорциональна линейным размерам. Отсутствие каких-либо оговорок дает нам повод усомниться в авторе распространить свои выводы на любой вид газового разряда, что представляется нам не вполне разумным. Это, в частности, относится к таким явлениям, в которых существенную роль могут играть квантовые процессы, не подчиняющиеся макроскопическим критериям подобия. Недостаточно убедительно объяснение ряда фактов расхождения эксперимента с результатами моделирования в применении к газовому разряду.

Возвращаясь к общей оценке рецензируемой книги, следует отметить, что имеющиеся в ней мелкие неточности заслуживают быть переоценены и считать очень существенными. Основные недостатки книги имеют дидактический и отчасти методический характер. Большое количество подстрочных примечаний, содержащих дополнительные пояснения к тексту, не может считаться за положительное качество изложения основного материала книги: думается, что неточности и неточности формулировок вызывали необходимость поправок и дополнений в примечаниях. Вследствие определения некоторых терминов можно найти только в примечаниях, хотя ими автор пользуется в основном тексте. Сюда относятся определения масштабов (стр. 11) и аналогов (стр. 37). С той же дидактической точки зрения нельзя признать удачным изложение в теории подобия. Действительно, в § 1,5 (2—23) излагаются теоремы подобия с неизбежным использованием понятия критериев подобия, которое еще не было достаточно наглядного разъяснения: то определение критериев подобия, которое можно найти на стр. 16, является совершенно абстрактным и формальным. Сложность этого определения читатель, не ознакомленный с теорией подобия, не сможет составить себе ясного представления о критериях подобия и будет оставаться в полном недоумении, по крайней мере, до 22 стр. Между тем, автор после упомянутого туманного определения сразу начинает оперировать с понятием критерия подобия, которое, не будучи иллюстрировано конкретным примером, еще долго должно оставаться загадкой для читателя. Вообще, автору, несмотря на изобилие примечаний, не вполне удалось сделать текст легко понятным для читателя. Например, на стр. 21 приведен рис. 1,3, долженствующий иллюстрировать математического моделирования, но он не отвечает цели из-за отсутствием удовлетворительных пояснений. Самый обычный разрез кабеля (рис. 1,3,а) и распределение температуры в кабеле». На стр. 20 дана таблица — «Подобие в электротехнике», представляющая собой попытку классификации объектов теории подобия. Эта таблица также дана без всяких обоснований

и пояснений, вовсе не будучи безукоризненной с принципиальной точки зрения. Не подвергая ее подробному анализу, отметим в качестве примера, что подобие волновых процессов, отнесенное в таблице к группе электрических цепей, кажется более уместным рассмотреть в группе электрических и магнитных полей.

В книге встречаются неточные и неполноценные формулировки. Приведем некоторые из них. На стр. 25 сказано, что физическое уравнение не может зависеть от средств познания. Эта формулировка не точна, потому что форма уравнения может весьма существенно меняться от выбора системы координат. На стр. 36 указано, что если $\varphi(ax, y)$ имеет вид $\ln ax, y$ и $\sin ax, y$, то преобразование типа (2,19) невозможно. Спрашивается, что же будет, если $\varphi(ax, y)$ будет иметь, например, вид $\ln^2 ax, y$ и т. п. — такой вопрос неизбежно возникнет у читателя.

Спорно утверждение на стр. 37, что «в конечном счете инженера, как правило, интересуют только относительные значения величин, характеризующих протекание процесса». Неудачная формулировка привела к неточному утверждению на стр. 44, что «если уравнения, описывающие протекание двух процессов, при соответствующем подборе основных базисных единиц, получили одинаковые численные коэффициенты, то эти процессы совершенно тождественны». Следует отметить, что процессы не тождественны, а подобны, только это и можно утверждать.

Примером неудачных формулировок может служить описание (стр. 103—104) конструкции подшипника, якобы уменьшающей трение до совершенно незначительных величин — практически до полного его уничтожения. Речь здесь идет, конечно, не об уничтожении трения, а только о разгрузке вала генератора от сил трения, с подводом энергии, расходуемой на трение, от вспомогательного двигателя. Рассматривая на стр. 130—131 конкретный случай применения типовой машины малой мощности для целей моделирования, автор ограничивается, без всяких оговорок, сопоставлением оригинала и модели только по параметрам $x_d, x_q, x_b, R, T_c, M_0$; между тем, для достаточного подобия необходимо также моделирование параметров x'_d, x'_q, x'_b . На стр. 132, касаясь моделирования явлений, связанных со статической устойчивостью, автор опять-таки без оговорок, пишет систему уравнений, характерную только для позиционных систем. К сожалению, это не единственные случаи неполноценности формулировок в книге.

Что касается методологического построения книги, то заслуживает быть отмеченным отсутствие хотя бы грубой оценки точности физического моделирования — в первую очередь энергетических систем. Такая оценка желательна для установления границ применимости этого метода исследования. Остался также не освещенным вопрос о возможности одновременного моделирования тепловых и электромагнитных процессов в электрических машинах.

С другой стороны раздельное изложение вопроса о моделировании трансформаторов, электрических машин постоянного и переменного тока, с позиций теории подобия, не вызывается необходимостью: общую теорию моделирования всех электрических машин, в том числе и трансформаторов, можно было бы основывать на некоторой общей системе уравнений. Впрочем, принятая автором схема раздельного анализа условий подобия электрических машин имеет преимущества наглядности.

Резюмируя изложенное, можно сказать, что рецензируемая книга, хотя и не лишена некоторых, преимущественно мелких, дефектов изложения, содержит ценный материал для инженеров и научных работников, желающих ознакомиться с вопросами теории и практики физического моделирования. В особенности ценным является описание конструкций и схем элементов модели, выполненной автором, несомненно, с затратой большого количества труда и времени. Данная работа является существенным вкладом в технику научно-экспериментального исследования сложных инженерных проблем в области электроэнергетики. Поэтому, несмотря на отмеченные недостатки, книгу В. А. Веникова можно рекомендовать вниманию достаточно широкого круга читателей инженеров и научных работников в области электроэнергетики.

Доктор техн. наук, проф. Н. Н. ШЕДРИН
Средне-Азиатский политехнический институт

А. Б. ЧЕЛЮСТКИН И Е. А. РОЗЕНМАН. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОКАТНЫМИ СТАНАМ

484 стр., ц. 24 руб. 35 коп. Металлургиздат, Москва, 1950.

Пожалуй, ни в одной отрасли промышленности роль электрического привода и его автоматизации не является столь выдающейся, как в области управления прокатными станами на металлургических заводах. Новые системы электропривода, и особенно блюмингов и полосовых станов горячей и холодной прокатки, обусловили огромные сдвиги в самом технологическом процессе прокатки и позволили резко повысить производительность станов и улучшить качество изделий.

Выдающиеся успехи по внедрению автоматизации в прокатное производство достигнуты в Советском Союзе. Еще в 1937 г. на Макеевском металлургическом заводе была осуществлена полная автоматизация нажимного устройства блюминга, а в 1948 г. на Магнитогорском металлургическом комбинате был пущен полностью автоматизированный прокатный стан.

Сказанное уже само по себе определяет значение рассматриваемой книги, отражающей практику работы наших проектных и научно-исследовательских организаций, а также заводских конструкторских бюро в области автоматизации прокатных станов и комплексной автоматизации технологического процесса прокатки.

Книга по необходимости охватывает обширный круг вопросов: в ней рассматриваются элементы теории автоматического регулирования, принципы и отдельные узлы автоматического регулирования, комплексные схемы автоматического управления прокатными станами и их вспомогательными механизмами и необходимые для этого специальные аппараты. В заключительной главе рассматриваются принципы автоматизации технологического процесса прокатки в целом.

Книга характеризуется научным подходом к рассматриваемым в ней вопросам, но в то же время она пронизана практической направленностью и отражает опыт работы самих авторов на ряде металлургических заводов по созданию новых систем автоматического управления прокатными станами. Вследствие этого книга одинаково понятна и интересна как учащимся, так и инженерам, имеющим дело с прокатным электрооборудованием, в какой бы области — проектирования, наладки или эксплуатации его — они бы ни работали.

Большинство помещенных в книгу расчетных формул выведено авторами самостоятельно, многие из них носят вполне оригинальный характер и, насколько известно, опубликовываются впервые. К числу таких новых материалов следует отнести описание успешно примененной на практике системы управления возбуждением посредством добавления так называемой «динамической емкости» (глава IV, § 7 и 9, глава V, § 5). Значительный интерес представляют глава VI, посвященная вопросам пуска и автоматического регулирования напряжения синхронных двигателей и глава 9 о станах холодной прокатки.

Ценной для проектировщика является и глава X, в которой подвергнуты сравнению четыре системы управления электроприводами вспомогательных механизмов посредством: 1) генератора с независимым возбуждением; 2) противокомпаундного генератора; 3) трехобмоточного генератора; 4) генератора с электромашинным усилителем.

Относительно много места авторы отводят рассмотрению новейших систем управления электроприводами реверсивных прокатных станов и станов холодной прокатки с применением электромашинных усилителей. Это является вполне обоснованным, так как освоение техники электромашинных усилителей в теории и на практике представляется сейчас весьма актуальным вопросом для электриков, имеющих дело с изучением или с эксплуатацией сложных автоматизированных электроприводов.

Одним из существенных недостатков книги является то, что авторы не всегда остаются на пути, предписанном названием и темой книги, и во многих местах ее уклоняются от вопросов собственно автоматизации в области теории электропривода и его переходных процессов. Конечно, характер протекания последних и относящиеся к ним расчеты тесно связаны с проектированием систем автоматического управления.

Поэтому можно было бы не жать против включения в рассматриваемую книгу этих материалов, если бы авторам удалось избежать некоторых недостатков в построении книги: теоретический анализ переходных процессов в книге занимает приблизительно 30% всего содержания и оттесняет на второй план новое содержание книги; между теоретическими выводами и рассмотрением самих систем автоматического управления (выбор параметров, исследование и т. д.) не проведена должная связь.

Как правило, теоретические выводы и формулы идут без численной проверки или иллюстрации и идут для читателей, особенно для работников в эксплуатации прокатных установок, являются немалым подспорьем. Примером изложения теоретического материала, не способствующего решению практических и выбору средств автоматизации, может служить глава «Автоматическое управление возбуждением двигателей реверсивных прокатных станов». Здесь в § 1 автор ставит перед собой задачу, уже неоднократно привлекавшую к себе внимание наших научных работников (Д. Г. Розов, Н. П. Куницкий), о наиболее рациональном изменении магнитного потока в функции времени разгона или торможения двигателя. Авторы предопределяют этот закон $\Phi = f(t)$ исходя из условия максимального использования двигателя, т. е. оставив динамическую составляющую только ту разность токов — в каждый момент времени — определяется одной стороны, током, допустимым (по нагреву и охлаждению) для двигателя, и, с другой стороны, током стальной нагрузки. При всей правильности такой постановки задачи последние выкладки авторов не могут оправданы. Вопрос рассматривается односторонне: ставится только уравнение движения электропривода с учетом электрического переходного процесса. Получается даже при таких упрощающих предположениях формула (211) отличается большой сложностью и не имеет практического значения, так как зависит от весового момента, следовательно, закон изменения магнитного потока с другими применяемыми способами. При таких обстоятельствах практическое значение проведенного авторами в этом параграфе доведения становится сомнительным.

Вся глава II посвящена целиком элементам автоматического регулирования и представляет собой спектр этой теории, изложенный приблизительно на нескольких страницах. Включение такого материала в книгу по автоматизации приводов можно только приветствовать, но глава II недостаточно связана с остальным содержанием книги, и ее данные и выводы нигде в дальнейшем не применяются. При описании конкретных установок автоматического управления авторы не прибегают к ним и не освещают таких вопросов, как, например, выбор параметров систем автоматического регулирования, ее устойчивости и пр. Вследствие этого вся глава в настоящем построении книги выглядит как обособленная часть.

Наряду с отмеченным наличием в книге обилия материала можно констатировать отсутствие некоторых коренных вопросов, имеющих непосредственное отношение к теме книги. Так, совершенно не затронут вопрос об автоматизации управления многоклетевыми и редукционными станами и, в частности, о применении для них так называемых регуляторов ударного действия.

В главе XI «Автоматизация технологического процесса прокатки» авторы строят изложение почти исключительно применительно к двигателям постоянного тока, тогда как известно, что именно в Советском Союзе в отличие от зарубежной практики автоматизация на металлургических заводах сделала большие успехи на основе применения

ней трехфазного тока для вспомогательных механизмов обойден молчанием столь важный для авиации алюминированный вопрос, как автоматическое управление для слитков (трансферкарой) и применение этой цели индукционных выключателей.

Вопрос средств автоматизации ограничивается электрической автоматикой (в главе III); электромагнитные цепи, несмотря на все возрастающее их значение, не упомянуты.

В книге, посвященной целиком вопросам электрического управления, хотелось бы встретить общую теорию автоматизации и некоторые данные экономического характера в смысле влияния автоматических средств на улучшение технологического процесса и на производительности труда; однако этого в книге нет.

Интересно авторам можно поставить и недостаточность изложения некоторых вопросов. В описании машинных усилителей с поперечным полем (стр. 110) мы не находим тех практических данных, которые все же знакомят с такими усилителями и характеризуют их, как то: встречающиеся на практике мощности числа об/мин таких усилителей, сопротивления управления и расходуемая в них мощность, на какие характеристики усилителей, влияние величины реактивного сопротивления и положения щеток на их характеристики и пр.

Вот те же самые замечания можно сделать и в отношении раздела «стабилизирующие трансформаторы» (120—123). Здесь приводится краткая теория таких трансформаторов и вывод о том, что «для получения минимального времени реагирования необходимо стремиться к постоянным времени цепей первичной и вторичной цепи были одинаковыми». Однако, как этот вывод осуществляется на практике, т. е. какие приняты для проектирования при конструировании трансформатора (секционированные обмотки, регулируемый воздушный зазор), мы опять-таки ничего не сообщаем.

Для регулятора скольжения приведена довольно хорошая теория его работы (стр. 267—271), отсутствует теория с практическими вопросами, возникающими при наладке или эксплуатации установок с регулятором скольжения. Авторы ограничиваются только ре-

комендацией того, что «реле обычно должно втягивать якорь при нагрузке, равной $1,5 M_n$, и отпускать якорь при $0,75 M_n$ ». Влияние величин уставки реле на экономическую сторону работы (потери энергии в роторе), роль наличных маховых масс привода не освещаются.

Применяемая в книге терминология в общем не вызывает замечаний, хотя авторы не везде относятся к этой стороне изложения достаточно строго. Так, структурная схема (стр. 165 и в других местах) на стр. 289 и 333 именуется уже функциональной схемой. Термин «магнитная станция», введенный на стр. 394, заменяется на стр. 395 названием «магнитный контроллер», хотя неудовлетворительность последнего термина уже неоднократно отмечалась. На стр. 156 и последующих вводится новый термин «регулирующие возбудители» с отсылкой за пояснением его к главе III. Однако ни в главе III, ни в каком ином месте книги такого пояснения не дается. Читателю представляется догадаться, что под термином «регулирующий возбудитель» авторы, повидимому, подразумевают узел, состоящий из обычного возбудителя и динамической емкости.

Оформление книги весьма хорошее: бумага, шрифт, наглядные и четко исполненные чертежи, наконец, сам переплет книги могут служить образцом для технической литературы.

В заключение следует признать, что, несмотря на указанные выше недостатки и пробелы, данная книга встречена с интересом обширным кругом читателей¹, в том числе и учащимися. При переиздании книги следует учесть сделанные выше замечания и предложения читательской конференции, в частности, полнее отразить в ней накопившийся в советской металлургии опыт по автоматизации электроприводов и показать инженерные методы расчета в сочетании с более глубоким раскрытием физической стороны исследуемых процессов.

Доктор техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

Центральная научно-исследовательская лаборатория электропривода и автоматики Министерства электропромышленности

¹ См. на стр. 85 информацию об обсуждении книги на читательской конференции МОНИТОЭ.



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(издания 1950 г.)

ДАТОНОВ С. А. РУДНИЧНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА БИХОВСКИХ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК. 476 стр., ц. 23 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

ИЗРЕВ Н. Н. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ, вып. I (МВО СССР. Главное управление поделкой вузов. Всесоюзный заочный энергетический институт). 160 стр., ц. 13 руб. 40 коп. Машгиз.

РОДСКИЙ А. Я. ДУГОВАЯ ЭЛЕКТРОСВАРКА В ИНЕРТНОМ СРЕДСТВЕ. 246 стр., ц. 13 руб. 40 коп. Машгиз.

СЕМЕНОВ Ю. В., КАЦ А. М., РЕЗЕЗОВ В. М., СОКОЛОВ С. А., СТЕПАНОВ Н. А. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН. Сборник статей под ред. М. З. 251 стр., ц. 16 руб. Госэнергоиздат.

ЭТО представляет собой сборник статей, посвященных главным образом устойчивости систем, обладающих нечувствительностью к содержанию звеньев с распределенной массой и сжимаемостью. Книга рассчитана на инженеров, работающих в области автоматического регулирования.

СТРОКОВИЧ Н. Г. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЧЕТЧИКИ И ИХ НАСТРОЙКА. Издание пятое, переработанное. 223 стр., ц. 10 коп. Госэнергоиздат.

В книге рассматриваются основные понятия по измерению мощности постоянного и переменного тока, а также реактивной мощности. Рассмотрены также счетчики, конструкции счетчиков, амперчасов, специальных тарифов, образцовых потерь на электроприводе и электролитических. Подробно рассмотрены вопросы организации и проведения работ в лаборатории

по регулировке и проверке счетчиков, указаны правила безопасности, которые необходимо соблюдать при этих работах. Даны сведения по эксплуатации счетчиков, их проверке на месте установки, правила и способы монтажа. Две последние главы книги посвящены учету электроэнергии в сетях высокого напряжения и ошибкам при включении счетчиков. Книга предназначена для техников и электромонтеров, занятых учетом электроэнергии и эксплуатацией, проверкой и регулировкой электрических счетчиков постоянного и переменного тока.

ГЕМКЕ Р. Г. НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. Издание четвертое. 230 стр., ц. 12 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

Книга по характеру изложения близка к справочнику. В ней содержится четыре основных раздела: А — Машины постоянного тока; Б — Асинхронные двигатели; В — Синхронные машины; Г — Общие неисправности электрических машин. Разделы изложены в виде таблиц, содержащих следующие графы: «Род неисправностей»; «Результаты осмотра»; «Причины неисправности»; «Способ определения и устранения неисправности». Приведены также 14 ценных приложений, в которых более подробно приводятся способы выявления и устранения основных неисправностей и даны справочные материалы в частности, приложение: «Изолирующие материалы и допустимые превышения температуры»; «Обозначение выводов машин и нормальные схемы соединения»; «Токи в валу и подшипниках»; «Определение нейтральной зоны электрических машин постоянного тока»; «Характеристики и выбор марок щеток»; «Сушка электрических машин». Подробно изложена технология сушки и методы контроля

Способы сушки различных видов машин, в частности, наиболее совершенный, экономичный и индукционный способ сушки за счет потерь в стали. Книга предназначена в качестве справочного руководства для техников, монтеров и машинистов, занятых монтажом и эксплуатацией электрического оборудования, однако круг лиц, который может ею пользоваться, значительно шире.

ГЕРАСИМОВ С. Г., ДУДИНОВ Е. Г., ЧИСТЯКОВ С. Ф. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК. Под редакцией С. Г. Герасимова. 424 стр., ц. 15 руб. 20 коп. Госэнергоиздат.

Книга является учебником по общему курсу автоматического регулирования тепловых установок для студентов энергетических вузов. Она содержит основные понятия об автоматизации электростанций, основные сведения по теории регулирования тепловых процессов, описание конструктивных схем автоматических регуляторов, получивших распространение главным образом на электростанциях, а также разбор принципов построения схем и систем автоматического регулирования котельных агрегатов и вспомогательного оборудования котельной и машинного зала.

ДОРФМАН Я. Г. БЕСЕДЫ О МАГНИТИЗМЕ (Академия наук СССР. Научно-популярная серия). 80 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Изд-во Академии наук СССР.

ЖУРАВЛЕВ А. П. УСТРАНЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В РАДИОПРИЕМНИКАХ (серия «В помощь радиолюбителю»). 48 стр., ц. 1 руб. 25 коп. Связьиздат.

ЗИМИН В. И., КАПЛАН М. Я., РАБИНОВИЧ И. Н., ФЕДОРОВ В. П., ХАККЕН П. А. ОБМОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИИ. Издание третье, переработанное. 560 стр., ц. 32 руб. 30 коп. Госэнергоиздат.

По своему содержанию книга состоит из двух частей: в первой части даны описания всевозможных обмоток, применяемых в электродвигателях как постоянного, так и переменного тока, а также в преобразователях. Вторая часть книги посвящена собственно производству самих обмоток. Такое расположение материала делает книгу весьма полезной для всех, кто связан с изготовлением, ремонтом и перемоткой электродвигателей. Ясное изложение без применения высшей математики делает книгу доступной самым широким кругам электротехников. Текст книги разбит на шесть отделов: схемы обмоток машин постоянного и переменного тока, материалы и конструкции обмоток, производство обмоток, испытания и перемотка обмоток, пересчет обмоток и организация труда. В тексте имеется около 500 иллюстраций.

ИВАШЕВ В. В. РЕМОНТ ТРАНСФОРМАТОРОВ. 231 стр., ц. 16 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

Книга разделена на две части. На первых 80 страницах рассмотрены элементы расчета и конструкции трансформаторов. В остальной части излагаются вопросы технологии и производства трансформаторов главным образом в аспекте их ремонта. В главах I и II описаны конструкции основных узлов: магнитопровода, катушек (виды обмоток), отводов, кожухов, переключателей и арматуры. Изложен поверочный расчет, показано, как можно по объему, эскизированию и некоторым замерам воссоздать заводскую расчетную записку. Даны вспомогательные для расчета и конструирования сведения: по изоляции и выбору изоляционных расстояний; характеристикам трансформаторной стали, рекомендуемым электромагнитным нагрузкам, нормам нагрева и способам расчета на нагрев. В главах III, IV и V изложены технология и вопросы организации ремонта и испытаний трансформаторов при ремонте. Подробно рассматриваются способы определения состояния изоляции и приведена классификация состояния изоляции. Указаны различные способы изолировки стали магнитопровода. Описан процесс сборки верхнего яра и способы изолировки шпильки. Полно и квалифицированно излагается технология ремонта и производства новых обмоток. Отдельные операции хорошо иллюстрированы рисунками (заводка затяжной петли, укладка последнего витка, отвод петель, гибка провода, намотка парных секций и пр.). Излагаются способы пайки. Рассмотрена вакуум-сушка, сушка в подогреваемых шкафах. Дан раздел вакуум-печи. Приведен элементарный расчет печи с электроподогревом. Описаны печи с индукционным подогревом. Даны указания по операциям прессовки и расклиновки катушек после сушки. Описано, как осуществляются уплотнения. Даны рецепты по армировочным замазкам. Изложены вопросы ремонта переключателей, баков, расширителей, арматуры и пр. В главе IV по организации ремонта дана детальная технологическая карта осмотра мелкого, среднего и капитального ремонта с указанием необходимого оборудования, инструмента, приспособлений и квалификации исполнителей. В главе V описаны виды испытаний, трансформаторов, схемы и установки к ним. Дана таблица наиболее часто встречающихся неисправностей, указаны документация к испытаниям и осветлены вопросы техники безопасности. Имеются ценные приложения: перечень оборудования испытательной станции; ряд заводских ин-

струкций, серии трансформаторов МТЗ и других заводов. Книга предназначена для среднего технического персонала, занимающегося ремонтом трансформаторов. Однако она является и пособием для конструктора и производственного трансформаторостроения.

КРАНОВЫЕ ТОРМОЗЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И ГИДРАВЛИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ, ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЧЕТА ВНИИПТМаш. 124 стр., ц. 5 руб. 50 коп. Машгиз.

КРЫЛОВ Н. И. ЗАДАЧНИК ПО СУДОВОЙ РАД. 148 стр., ц. 7 руб. 60 коп. Связьиздат.

КРЫЛОВ Н. Н. ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА. 112 стр., ц. 7 руб. 60 коп. Связьиздат.

ЛАВОРКО П. К., ЛЕВИТСКИЙ С. Г. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ПРИБОРОВ. 232 стр., ц. 10 руб. 70 коп. Машгиз.

ЛАЙНЕР В. И. ГАЛЬВАНОТЕХНИКА. Пособие для повышения квалификации мастеров. Издание второе, переработанное. 186 стр., ц. 10 руб. 70 коп. Машгиз.

ЛЯПУНОВ А. М. ОБЩАЯ ЗАДАЧА ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ. 471 стр., ц. 15 руб. 45 коп. Государственное технико-теоретическое издательство.

В этом классическом труде излагаются некоторые решения вопросов о тех свойствах движения, в частности, о тех, которые известны под названием устойчивости и востости. В главе I дается предварительный анализ, а в главе II — приводится исследование установившихся движений периодических движений. В заключение приводятся некоторые статьи, написанные А. М. Ляпуновым.

МИХАЙЛОВ Г. П. СВАРКА ТРЕХФАЗНОЙ ДУГОЙ. 7 руб. 65 коп. Машгиз.

ПОНОВ В. С. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Издание третье, переработанное. Министерство высшего образования СССР в качестве учебника для неэлектротехнических техникумов. 496 стр., ц. 16 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

В книге простым и ясным языком изложены основы техники в применении к нуждам среднего электротехнического персонала промышленных предприятий. Этим объясняется особое внимание в книге к разделам электрических машин. Вопросы производства, передачи и распределения электрической энергии рассматриваются лишь в основных чертах. Все содержание книги разбито на разделы: основы электротехники, куда входит также главы электрических измерений и приборов, второй раздел — электрические машины и преобразователи, включая главу об уходе за электрическими машинами, и третий раздел — применение электротехники в промышленности, включая главы об электрическом освещении, электросварке, электротермии и главу о производстве, передаче и распределении электрической энергии. Текст иллюстрирован большим количеством рисунков, а также портретами выдающихся электротехников.

РЕФЕРАТЫ ДОКЛАДОВ НА СОВЕЩАНИИ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И МИКРОСКОПИИ 15-19 ДЕКАБРЯ 1950 г. (Академия наук СССР. Отделение физико-математических наук, отделение биологических наук, отделение технических наук). 115 стр., бесплатно. Академия наук СССР.

СУЛАКОВИЧ Д. И. ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫЙ ИНСТРУМЕНТ. Допущено в качестве учебного пособия для техникумов строительного и дорожного машиностроения. 228 стр., ц. 8 руб. 50 коп. Машгиз.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ К ОБЛАСТНОМУ СОВЕЩАНИЮ ПО СВАРКЕ ТРЕХФАЗНОЙ ДУГОЙ 16-18 МАЯ 1950 г. (ВНИИ и Уральский дом техники). 39 стр., бесплатно. Машгиз.

ТРОЯНОВСКИЙ В. В. МОНТАЖ И ОБСЛУЖИВАНИЕ ТРОЧАСОВЫХ МЕХАНИЗМОВ (Ленинградский завод электротехники). 116 стр., ц. 5 руб. Машгиз.

ШМАРГУНОВ К. Н. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОЛОТКИ И ОТБОЙНЫЕ. 120 стр., ц. 4 руб. 90 коп. Машгиз.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ. Труды МГИИП. Под редакцией В. Д. Алесина. 92 стр., ц. 3 руб. 75 коп.

Сборник содержит составленные по результатам научных исследований работы статьи научных работников Московского государственного института мер и измерительных приборов; статьи посвящены новым методам измерения и повышению точности измерений, а также вопросам конструирования измерительных приборов. В числе помещенных статей — «Метод измерения низких частот с повышенной точностью» (канд. техн. наук Э. С. Лишин), «Расчет потерь трансформаторов тока» (канд. техн. наук М. И. Левин), «Потери в воздушных конденсаторах и об одном опыте их измерения» (канд. техн. наук М. А. Бывков) и др.

ЭЛЕКТРОНАГРЕВ ЗАГОТОВОК ДЛЯ КОВКИ И ПЛАВКИ (технология, режимы, освещение). Сборник под ред. М. ЗИНСКОГО. 192 стр., ц. 10 руб. 30 коп. Машгиз.

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ АВТОРАМИ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

1. Основным условием для статьи, представляемой в журнал «Электричество», является сочетание в ней научной ценности и практической направленности содержания, а также возможности использования читателями публикуемых материалов в их инженерной и научной деятельности. Статьи должны отражать новейшие достижения науки и техники и передовой опыт промышленности и других отраслей народного хозяйства Союза ССР.

2. Оригинал, предназначенный для опубликования в журнале, должен представляться в двух полностью комплектных экземплярах, отпечатанных (на бумаге, пригодной для правки чернилами) на машинке через два интервала (первый и второй экземпляр с машинки) с одной стороны листа стандартного размера, с полями в левой стороны в 3—5 см. Текст должен быть отчетливым, без помарок и вставок. Размер статьи не должен превышать 0,5 авт. листа (12 стр. текста на машинке с 5—7 рис.).

3. Вместе со статьей, направляемой в журнал, необходимо сообщить следующие сведения: а) является ли статья законченной работой автора или же она представляет часть выполненной им или при его участии научно-исследовательской работы (указать ее тему); б) какое практическое значение имеет статья и в какой области получили или могут получить применение выводы, изложенные в статье; в) обсуждались ли где-либо статья или содержащиеся в ней материалы и какая оценка была дана.

Статьи и обзоры, сообщающие о результатах работ, проведенных по заданию или по плану организаций, представляются вместе с письменным разрешением этих организаций на опубликование и со справкой организации о том — представляет ли статья научную работу или часть научной работы уже оплаченной автору.

4. К статье должна прилагаться аннотация (краткое изложение основных положений статьи) размером не более 0,5 стр. на машинке.

5. Оригинал (в 2-х экз.) должен быть тщательно проверен (особое внимание следует обратить на цитаты, формулы и рисунки) и подписан, с указанием фамилии, имени и отчества автора, даты, точного почтового адреса и места работы. Все примененные автором в статье обозначения выписываются для руководства типографии на отдельный лист с указанием: 1) что символ обозначает; 2) какого алфавита буква (русская, латинская, греческая), строчная или заглавная; 4) если буква имеет индекс, указать: какого он алфавита, строчный или заглавный.

6. Разделы (главы) статей должны выделяться особыми подзаголовками; в необходимых случаях важные места текста выделяются *курсивом* или *разрядкой*. Выводы, обобщающие содержание статьи, помещаются в конце ее.

7. Статьи, в которых сообщается о новых методах исследования или расчета, должны содержать соответствующие численные примеры из конкретной электротехнической практики. Вспомогательные математические выкладки и промежуточные преобразования формул, а также примеры расчетов выносятся *обязательно* в отдельные приложения, засчитываемые в размеры, указанные в п. 2.

8. Буквенные обозначения электротехнических и общетехнических величин должны соответствовать ГОСТ 1494-49 и 1493-47. Необходимо руководствоваться принятыми в журнале сокращениями обозначений единиц измерения.

9. Формулы помещаются в отдельной строке, а не в строке текста. Формулы, обозначения показателей степени и индексы должны быть вписаны от руки чернилами ясно и отчетливо. Особенно ясно должны различаться сходные по начертанию заглавные и строчные буквы (*C* и *c*, *K* и *k*, *O* и *o*, *S* и *s*, *U* и *u*, *V* и *v*, и т. д.) и буквы, трудно различимые в рукописном изображении: *e* и *l*, *I* и *J*, *g* и *q*, *n* и *u*, *V* и *U* и др., а также *x* и *χ* (греческая), *a* и *α* (греческая). Прописные (заглавные) буквы рекомендуется подчеркивать карандашом двумя черточками снизу (например, *O*), а строчные — сверху. 0 (ноль) не подчеркивать. Греческие буквы заключать в кружок карандашом.

10. Следует ставить: над символами комплексных величин точки (например $\overset{\cdot}{I}$), над сопряженными комплексами $\hat{\wedge}$ (например \hat{I}), над векторами — черту (\vec{H}).

11. При перечислении предпочтительно пользоваться цифрами и во вторую очередь буквами (русского алфавита).

12. Таблицы должны снабжаться заголовками и порядковыми номерами.

13. Сноски нумеруются (звездочек не применять!) в порядке их последовательности в тексте.

14. Сокращения слов не допускаются, за исключением общепринятых известных сокращений: ВЭИ, МЭИ, гас, к. п. д., э. д. с. и т. д.

15. Указания на фамилии иностранных авторов в тексте статей даются в русской транскрипции. Лишь после упоминания автора в первый раз дается в скобках ориги-



нальная транскрипция. Русские авторы и другие упоминаемые в тексте лица обязательно указываются с инициалами.

16. Иностранные географические названия даются по-русски и лишь в необходимых случаях, после упоминания названия в первый раз, дается в скобках оригинальная транскрипция.

17. Цитируемые литературные источники должны быть приведены в конце статьи в библиографическом указателе (Литература). Ссылки на источники в тексте сопровождаются взятыми в квадратные скобки буквой Л и порядковым номером источника в библиографическом указателе статьи, например [Л. 3]. [Л. 1—5].

18. Библиографический указатель (Литература) должен составляться в следующем порядке: а) для журналов — инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), название статьи (иностранный — в русском переводе), название журнала, часть или том (для журналов, не имеющих счета томов, номер), страница начала статьи, год издания; б) для книг — инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), заглавие книги и том, число страниц, наименование издательства (для иностранных изданий — место издания), год издания. После фамилии автора, а также после названия статьи ставится точка; остальные библиографические данные разделяются запятыми. Названия книг, статей и журналов в кавычки заключать не следует. В ссылках на журнальные статьи слово «журнал» не пишется. При обозначении года слово «год» опускается.

19. Рисунки (чертежи, графики, диаграммы, номограммы и пр.) вычерчиваются черной тушью на плотной белой бумаге (можно на миллиметровой бумаге или на кальке). Графики, диаграммы и т. п. должны иметь сетку. Значения делений должны быть четко проставлены простым карандашом. Обозначения величин указывать карандашом над осью абсцисс и с правой стороны оси ординат, а единицы измерения — под осью абсцисс и с левой стороны оси ординат. Стрелки по концам осей не ставить.

20. Все линии чертежей, графиков и прочих рисунков, выполненных тушью, должны быть четкими, без расплывов по краям, без утолщений в местах соединений и пересечений. В случае применения в рисунках штриховки, нанесение ее должно производиться с учетом возможного уменьшения размера рисунка при изготовлении клише.

21. Пометки и надписи, относящиеся к графическому материалу, должны быть сделаны вне площади рисунка, на свободном поле и на достаточном расстоянии от рисунка.

22. Условные обозначения в площади рисунка должны быть предельно краткими и общеупотребительными. Проставлять их следует простым карандашом, так как надписи тушью в площади рисунка выполняются, в целях единообразия почерка, графическим бюро издательства. Расшифровка примененных условных обозначений дается без сокращений на свободном поле или в приложении к каждому рисунку вместе с его наименованием для набора надлежащей подписи к рисунку. При этом следует максимально разгружать рисунок от второстепенных надписей и сложных обозначений, которые целесообразно выносить в подпись к рисунку.

23. Фотографии должны быть отпечатаны на белой гладкой бумаге. Изображение должно быть контрастным, с резкой проработкой всех деталей. Фотосъемка должна быть выполнена при достаточно сильном освещении. Подсвечивание главного предмета съемки должно быть достаточно ярким: свет должен усиливать восприятие основных линий и деталей изображения. Главный предмет съемки не должен сливаться с фоном или с другими предметами, изображенными на фотоснимке, и должен быть заснят под таким углом, чтобы иллюстрация, поясняющая текст, отличалась максимальной выразительностью.

24. Для иллюстраций авторы должны отбирать графический материал такого размера, чтобы при изготовлении клише было возможно уменьшать изображение.

25. Рисунки, фотографии и пр. должны быть пронумерованы и перечислены в специальной описи. Ссылки в тексте статьи на рисунки, фотографии и пр. должны строго соответствовать сделанной нумерации. На обороте каждого рисунка следует указывать фамилию автора статьи и номер, соответствующий ссылкам в тексте.

26. В описи должны быть точно указаны источники предлагаемого авторами графического материала. Графический материал, заимствованный автором из неопубликованных работ научно-исследовательских институтов, предприятий и учреждений или иллюстрирующий работы этих организаций, должен сопровождаться разрешением организаций на опубликование. При заимствовании графического материала из опубликованных работ надлежит указывать литературный источник.