

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1951

(Э)
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

3

**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 со средоточенными постоянными	28
И. И. Кантер — Теория работы многофазных несамоуправляемых инверторов с конденсаторной коммутацией	33
Д. И. Марьиновский 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. Городской — Простой способ численного решения алгебраических уравнений	65
Я. А. Ирлахман и Ф. П. Левин — Металлические распределительные устройства 6—10 кв для наружной установки	66
СТАНДАРТЫ И НОРМЫ	
Г. Б. Холявский, Л. К. Грэйнер, К. Е. Булгаков — Проект ГОСТ „Аппараты электрические высокого напряжения. Классификация и терминология“	68
ДИСКУССИИ	
Проект стандарта на номинальные напряжения стационарных электрических сетей	72
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 становами“	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	95



ВНИМАНИЮ ГОДОВЫХ ПОДПИСЧИКОВ НА ЖУРНАЛ

В марте с. г. годовым подписчикам на журнал «Электричество» рассыпается бесплатное приложение: карманный книжка «Календарь-справочник „Электричество“» на 1951 г.

Годовые подписчики, не получившие указанного приложения, должны незамедлительно обратиться в отделения Союзпечати и 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 Электротранс
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648

Вклад академика С. И. Вавилова в советскую светотехнику

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

Комиссия по светотехнике ОТН АН СССР

ная деятельность покойного академика Ивановича Вавилова¹ была настолько обширной, что для достаточно полного ее описания требуется книга, которая несомненно в дальнейшем будет написана. С. И. Вавилов внес крупный вклад в развитие советской науки и техники: им создана новая важнейшая физическая оптика — микрооптика, создана люминесценция и под его руководством осуществлялись многообразные ее применения. Помимо на значении деятельности академика С. И. Вавилова для развития советской науки и смежных областей знания.

Работая в двадцатых годах профессором Московского высшего технического училища, Вавилов, наряду с курсом физики, читал теоретической светотехники. Уже тогда Сергеевич высказывал мысль о возможности создания новых источников холодного света, которых 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 этого закона фотометрии — экспоненциальный закон поглощения света при его прохождении через поглащающую среду. В эти годы уже выкристаллизовались основные научные идеи С. И. Вавилова. Это — люминесценция, тесно связанная с ее теорией, совокупление начавших вопросов физической оптики и структуре света. Научные заслуги Вавилова получают высокое признание: в 1932 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 им. 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 связанный с оптико-механической промышленностью научного учреждения. Здесь С. И. Вавиловым были выполнены многие из принесших ему всемирную известность исследований, например, по фотoluminesценции растворов, зрителю 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 недостатки 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 длиною 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 фотolumинесценции. 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 наложено.

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, люминесциющих 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, в тельно оценивал выполненные работы и разделял научные задания и поручения. Большое внимание Комиссия по люминесценции уделяла в частности, светотехническим вопросам и ганде идей новой светотехники. Доклад на союзном совещании по светотехнике в 1947 г. С. И. Вавилов закончил словами: «Ключение можно пожелать, чтобы совместными усилиями физиков, химиков, светотехников и мышленности люминесцентная светотехника СССР возможно скорее вытеснила тепловую технику на второстепенное место. К этому есть принципиальные и технические предпосылки».

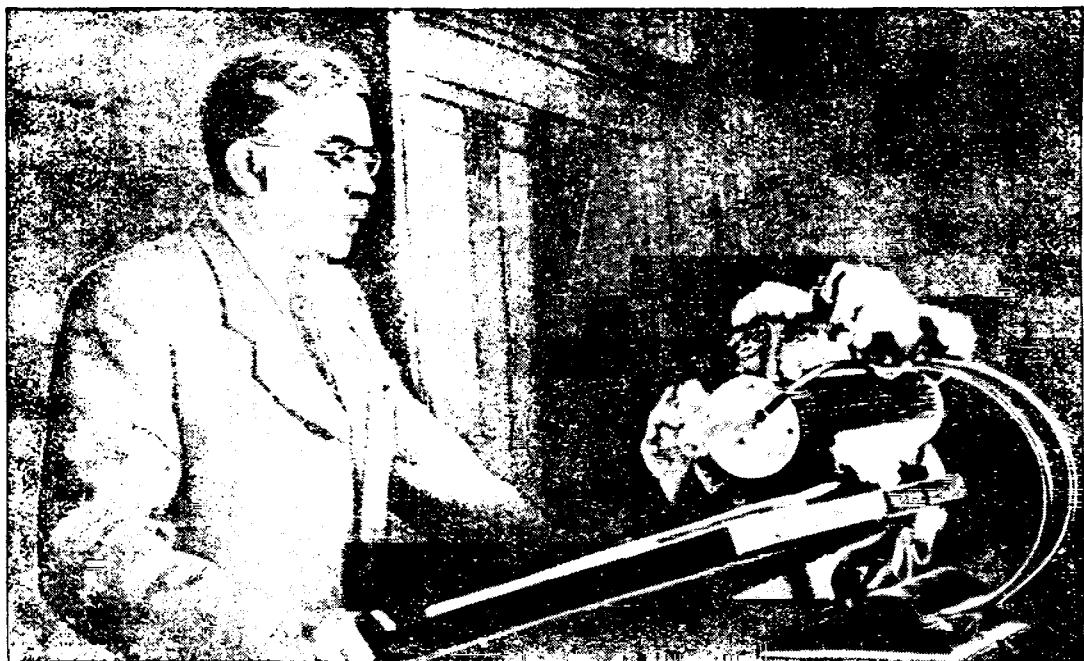
К 1948 г. накопилось большое число теоретических и практических работ по люминесценции требовавших обсуждения. Второе всесоюзное совещание по вопросам люминесценции и применению светосоставов состоялось в Москве в 1948 г. В докладах Второго совещания большой удельный вес занимали вопросы внедрения в жизнь методов люминесценции. Кроме докладов о производстве люминесцентных ламп, сколько докладов было посвящено применению этих ламп в крупных осветительных и областных 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 работ 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 плодотворное участие. С. И. Вавилов указал 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, повышен 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 частности, лампы, дающие ультрафиолетовую радиацию. Совсем недавно были построены, в частности, новые образцы эритемных или солнечных ламп. В производственных, учебных, общественных и др. помещениях, оборудованных новыми осветительными установками, будет только светло. Помещения будут освещаться лазерными дозами ультрафиолетовой радиации, восполняющей недостаток солнечного света, особенно важного в северных районах страны.

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

⁴ Электричество, № 12, 1947 г. (Донецкая областная универсальная научно-техническая библиотека)



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 осветительные установки с люминесцентными лампами — в шахтах Донбасса, на станции Московского метрополитена, в картинных залах 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 специалистами в выборе спектрального состава света и в установлении норм освещения. С. И. Вавилов был большим знатоком редким ценителем произведений искусства. 10 марта 1947 г. в Эрмитаже открылась освещенная люминесцентными лампами галерея, 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 состоявшимся в те дни сессии Академии наук СССР, посвященной истории русской науки. Члены сессии и приглашенные гости осматривали картинные галереи Эрмитажа, впервые получившие такое искусственное освещение и открывавшие в вечернее время. С. И. Вавилов интересовался мнением присутствовавших о восприятии при новых источниках света. Освещение Эрмитажа С. И. Вавилов считал «огромным подарком не только всем ленинградцам, но и всем советским людям»⁵.

Значительны практические применения люминофоров и вне области производства люминесцентных ламп. Светящиеся порошки кристаллического

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

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 трубы, 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

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 возглавляемого 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. Вавилов.

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

Работы Сергея Ивановича, посвященные изучению природы света и созданию теории превращения свечения, явились крупным вкладом в общую физическую науку и светотехнику. Отечественный 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 явлений. Труды Сергея Ивановича по люминесценции растворов и оптике поглощающей люминесцирующей среды имеют фундаментальное значение. В законченной в 1950 г. книге «Микроструктура света» С. И. Вавилов подытожил свои многие исследования в области физики и светотехники. За работы в области фотoluminesценции С. И. Вавилову в 1943 г. была присуждена Сталинская премия второй степени. За участие в исследованиях люминесценции, возникающей под действием жесткой радиации гамма-лучей, приведших к указанному выше выдающемуся открытию электронного характера нового света, С. И. Вавилову и его даровитым ученикам в 1946 г. была присуждена Сталинская премия первой степени.

Память о крупнейшем и талантливом отечественном ученом, славном патриоте социалистической Родины, принесшем все свои знания и силы на благо делу развития науки и культуры, делу коммунизма, академику Сергею Ивановичу Вавилову 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 зажигания искрового разряда (напряжение зажигания) является напряжением возникновения самозарядного 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, а же перейти в какую-либо другую стадию (зажигающий разряд, дуговой). При снижении напряжения до величины напряжения гашения проходит 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 разряд) с увеличением тока заполняет отверстия падение напряжения замедляется, а затем нарастает 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 $l = 100 \text{ см}$ и образца дуба длиной $l = 50 \text{ см}$ напряжения гашения получаются почти одинаковыми (рис. 1).

Дуговой разряд отличается от искрового большой плотностью тока на катоде, наличием автотрансформации 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-

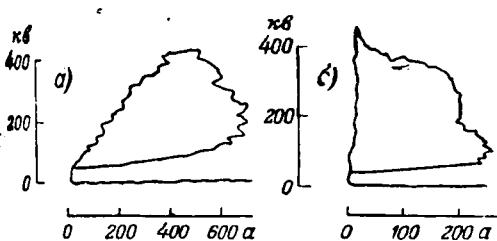


Рис. 1. Вольтамперная характеристика при разряде вдоль волокон.

a — дуб, $l = 50 \text{ см}$; б — сосна, $l = 100 \text{ см}$.

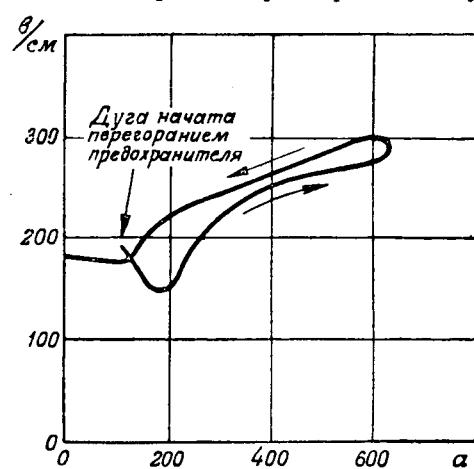


Рис. 2. Вольтамперная характеристика дуги в отверстии жировика диаметром

$0,178 \text{ см}$,

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

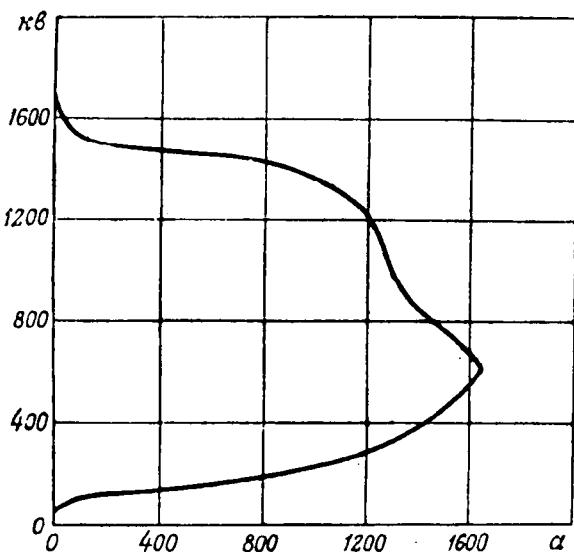


Рис. 3. Вольтамперная характеристика при разряде по поверхности непропитанной деревянной опоры (сосна), $l = 6,25 \text{ м}$.

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 расщепляется. Как показали испытания, проведенные в лаборатории им. Смуррова 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 $l = 6,25 \text{ м}$) приведена на рис. 3, она имеет вид падающей кривой с напряжением зажигания (начала разряда) $U_p = 1725 \text{ кВ}$ и напряжением гашения $U_g = 40-45 \text{ кВ}$.

Активная длина образца, пропитанного креозотом, при испытаниях в лаборатории им. Смуррова 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

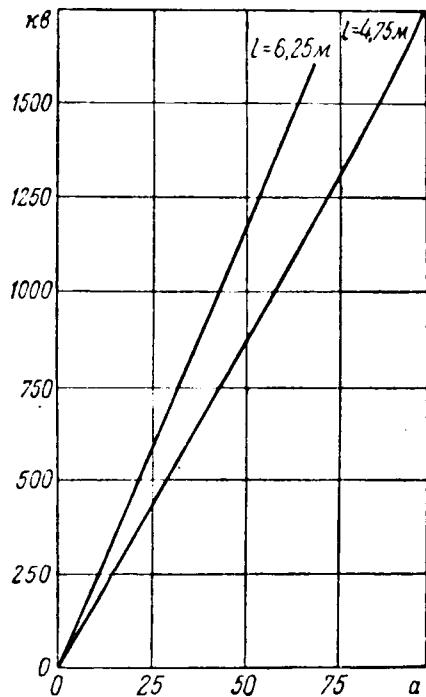


Рис. 4. Вольтамперная характеристика предразрядного тока пропитанного креозотом образца дерева.

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 дерева (сосны) $l = 4,75 \text{ м}$ приведена на рис. 4. 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, по члену наступает крутой, но незначительный абсолютной величине подъем тока. Повидимому, когда дерево расщепляется, происходит некоторое ограничение канала разряда и разряд частично идет вдоль волокон внутри дерева. Так как при токах, обусловленных параметрами контура дерева незначительно расщепляется, то при определенной амплитуде тока разряд распространяется за пределы канала и ток вновь резко возрастает. Это явление интересно было бы посмотреть 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 применяется как пропитанная, так и непропитанная древесина. Линии передачи напряжением 110 и 35 кВ деревянных опорах с полным использованием изоляции дерева нашли большое распространение вследствие дешевизны их и сравните-

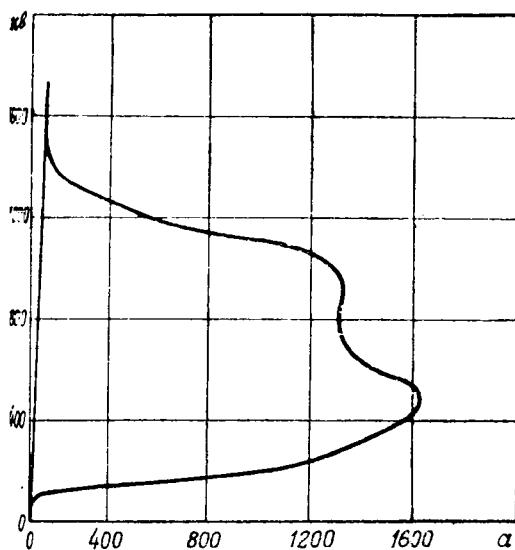


Рис. 5. Вольтамперная характеристика деревянной пропитанной креозотом опоры, $I = 4,75 \text{ м}$.

кой грозоупорности. Недостатком бестросовых линий передачи на деревянных опорах является то, что при прямых ударах молний дерево расщепляется. Это в большинстве случаев препятствует дальнейшей работе линии, но существует более быстрому загниванию древесины. Повреждения, при которых невозможна дальнейшая работа линии (расщепление траверс зданием проводов на землю, пережог проводов, загорание траверс и т. д.), имеют место при U 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 ульсным перекрытием. Экспериментальные данные многих авторов [Л. 5, 6, 7, 8] указывают различные значения градиентов, при которых идет дуга. Отмечается также большое значение фазного угла при образовании дуги тока повышенной 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 2 кВ/м вообще невозможна.

Некоторые авторы [Л. 10] считают, что большинство работ дает завышенные значения безошибочных 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, возникновение 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 междуфазных расстояниях в $2,5$ — $3,5 \text{ м}$.

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

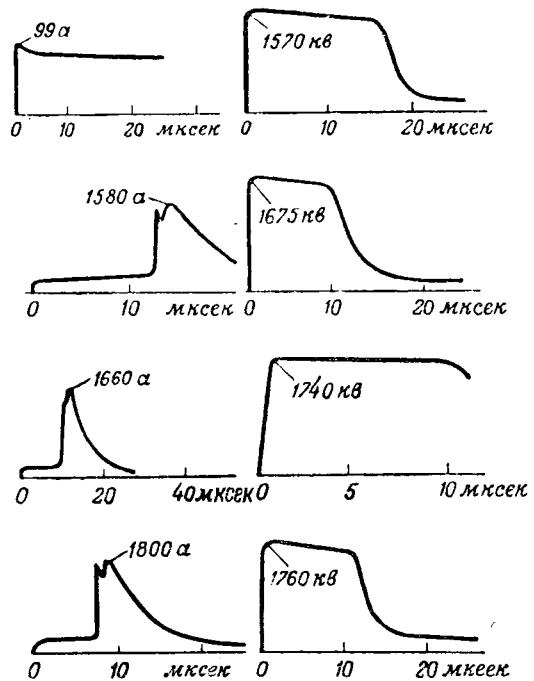


Рис. 6. Осциллограммы разрядного тока и напряжения пропитанного креозотом образца сосны, $l = 4,75 \text{ м}$.

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 $l = 6,25 \text{ м}$ 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 $U_2 = 45$ — 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. Так же значительно меньшим должно быть число отключений при разряде с провода на землю. Опыт работы различных энергосистем под-

тврждает это положение. Так, при анализе грозовых 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 сопровождались 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 вентильными свойствами дерева не только при разряде вдоль волокон внутри дерева, но и при разряде по поверхности дерева.

То обстоятельство, что дерево опор при грозовых 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 теряет 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 расходится меньше, но вследствие проводимости пропитанного дерева разряд прижимается к поверхности и все процессы, связанные с ограничением дуги, в пропитанной древесине имеют место в большей степени.

Следовательно, применение пропитанной древесины помимо увеличения срока жизни способствует также увеличению грозоупорности линий передачи на деревянных опорах.

Надо признать безусловно правильным положение В. В. Бургсдорфа [Л. 10] о применении деревянных подкосов с целью увеличения пути разряда по дереву, во многих случаях отвращающих междуфазное перекрытие поверхе-

Литература

1. М. М. Некрасов и С. Л. Зайенц. Амперные характеристики дерева. Электричество, № 1937.
2. Н. А. Капцов. Электрические явления в вакууме, ОГИЗ, 1947.
3. А. Энгель и М. Штенбек. Физика и теория электрического разряда в газах, т. I и II, ОНТИ, 1936.
4. А. А. Смуро. Электротехника высокого напряжения и передача энергии, т. III, ОНТИ, 1935.
5. В. В. Бургсдорф. Открытые электрические дуги большой мощности. Электричество, № 10, 1948.
6. М. М. Акодис. Развитие грозового разряда силовую дугу и методы его изучения. Электричество, № 3, 1941.
7. J. R. Eaton, J. K. Peek, J. M. Dunham. Experimental Studies of Arcing Faults on 75 kV Transmission System. El. Eng., № 11, 1931.
8. P. L. Bellaschi, Wood Pole Line Insulation. El. Eng., № 7, 1947.
9. Д. В. Шишман. Грозовые поражения линии 35 кв на деревянных опорах без троса. Эл. станция, № 3, 1941.
10. В. В. Бургсдорф. Исследование грозозащиты энергосистем, Электричество, № 2, 1949.

120.9.12



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 полюсной синхронной машины особые за-

щущения представляет определение продольной и поперечной индуктивности якоря и индуктивности обмотки возбуждения. Определение этих параметров связано с необходимостью расчета построения магнитных полей в воздушном зазоре между стальными поверхностями якоря и ротора, созданных м. д. с. статора и ротора.

В общем виде при наличии магнитопровода переменной магнитной проницаемостью μ и в конечной 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 отбора вычерчиваются два взаимно ортогональных и удовлетворяющих граничным условиям семейства кривых: семейство силовых линий и семейство линий равного магнитного потенциала, изывающих воздушное пространство, не занятые током, на криволинейные квадранты [Л. 3, 4]. Недостатком этого метода является большая трудоемкость, препятствующая его практическому использованию. Для инженеров, занимающихся расчетом электрических машин, весьма желательно иметь такие зависимости, которые позволили бы легко рассчитать необходимые параметры.

Основными геометрическими величинами, влияющими на пространственное распределение величин 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 увеличивают 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.

Приближение пространственного распределения поля к синусоиде. С этой целью очертание полюсного 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 δ_{\max} и δ_{\min} (рис. 1). Таким образом, амплитуда гармоник поля будет зависеть от трех геометрических величин: коэффициента полюсной дуги α , $\frac{\delta_{\min}}{\tau}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}}$. 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],

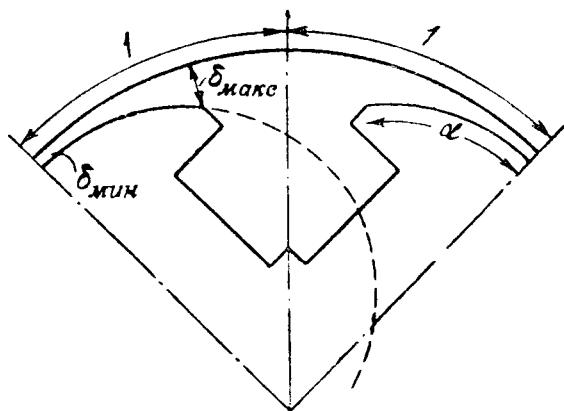


Рис. 1. К заданию конфигурации магнитной цепи явнополюсной синхронной машины.

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

Для искомых гармоник поля имеем некоторые зависимости вида:

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

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

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

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

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

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

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

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

Придерживаясь указанной методики, можно получить, следовательно, в общем случае одно семейство кривых для $a = \text{const} = 0,5$ и ряд семейств кривых дополнительного множителя A для различных значений третьей переменной (в нашем примере $\frac{\delta_{\min}}{\tau}$). Семейство 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 большой трудоемкостью объясняется то, что работа никогда не подвергалась проверке. Тем, обращает на себя внимание, что для иных амплитуд гармоник Виземан приводит в два семейства кривых, а так как при этом же делает никаких дополнительных допущений можно предположить, что Виземан принял дополнительный множитель A независящий от третьей переменной. Но тогда кажется непонятным, почему для разных гармоник эта индуктивная 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 принципиальной весьма заметной, неточности, величину которой надо в каждом данном случае еще определить. Некоторые точки кривых Виземана могут быть легко проверены теоретически без необходимости построения картин полей. Так, продолжая кривые Виземана для $a = 0,5$, $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 1$ до пересечения с осью ординат (до $\delta = 0$), получаем точки, которые определяются аналитически. Например, для v -той гармоники продольного поля якоря в долях максимального значения индукции в середине полюса имеем:

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

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

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

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

Все указанные обстоятельства приводят к мнению о правильности кривых Виземана. Эти сомнения вызвали необходимость детального исследования данного вопроса. Результаты исследования, в большинстве значительно расходящиеся с результатами Виземана, приводятся в настоящей работе.

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

более полезно в силу принципиального характера затронутого вопроса.

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

Пытаясь 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 этом 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 результат практически не зависит от числа полюсов. Этот вывод совпадает с соответствующим указанием Рихтера [Л. 3]. Поэтому все картины полей вспомогательными построены для случая бесконечного числа полюсов, т. е. для спрямленного статора. Указанные у Виземана никаких указаний на счет не имеется. Дальнейшие детали методики несколько отличаются для составляющих якоря по продольной и поперечной осям и числа полюсов, поэтому рассмотрим их отдельно.

Продольное поле якоря. Реальное магнитное поле в воздушном пространстве между стальными поверхностями статора и ротора рассматривается состоящим из двух частей: поля между полюсами и поля в воздушном зазоре под полюсным наконечником. Каждое изображение 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 волях максимальной индукции в середине полюса. Последняя же определяется как величина, обратно пропорциональная минимальному воздушному зазору под серединой полюса. Найдя амплитуду ν -той гармоники $B_{0\nu}$, лежащей у поверхности якоря в междуполюсном пространстве при одном минимальном зазоре с $p_1 = p_2$, легко можно определить соответствующую

амплитуду $B'_{0\nu}$, при другом минимальном

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

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

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:

$$\frac{B}{B_{00}} = \frac{\cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2x}{\tau} \right)}{1 + \frac{p-1}{\alpha^2} \left(\frac{2x}{\tau} \right)^2}, \quad (5)$$

где B — индукция в точке с координатой x ;

B_{00} — 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 искомые амплитуды гармоник поля от составляющей поля под полюсом.

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

$$B_\nu = B'_{0\nu} + B_{t\nu} = B_{0\nu} \frac{p_1}{p_2} + B_{t\nu}. \quad (6)$$

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 $B_s = B_{d_1}$. В еще более частном случае при постоянном воздушном зазоре под полюсом, равном нулю, получаем для амплитуд гармоник B_s , 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 большой частью полюсного башмака с достаточной точностью выразить в виде:

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

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 полюсными 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 $\frac{\delta_{\max}}{\tau} = 0$ 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

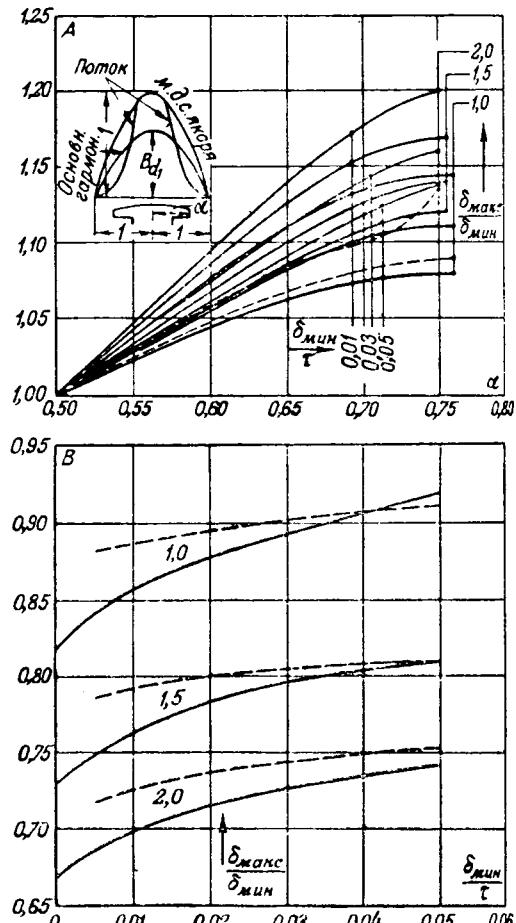


Рис. 2. Кривые для определения амплитуды основной волны потока якоря по продольной оси полюсов. $B_{d_1} = B \times A$.

нулю, получаем для амплитуд гармоник 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 между полюсами пространство в значительной мере заполнено обжатой возбуждения, где $\text{rot } H \neq 0$, поэтому непосредственно вышеуказанный графический метод построения поля неприменим. В этом случае поле между полюсами может быть сравнительно просто построено, если заменить реальную обмотку возбуждения эквивалентным витком, надлежащим образом расположенным на полюсе [Л. 9]. Весь поверхность, где поле нас в основном интересует, распределение поля с большой степенью точности соответствует истинной картине поля.

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

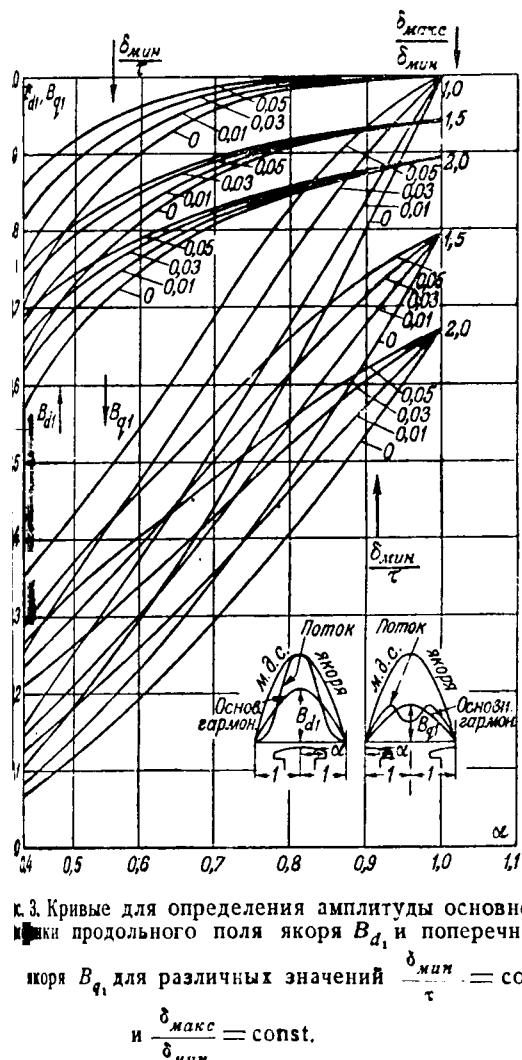


Рис. 3. Кривые для определения амплитуды основной волны потока возбуждения $B_{f_1} = f(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const}$.

в 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 междуполюсном пространстве становится исчезающее по сравнению с полем под полюсом, величина 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 схемы было проведено весьма обширное исследование магнитных полей якоря и полюсов. Полученные результаты приводятся нами для величин a , $\frac{\delta_{\min}}{\tau}$, $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = p$, лежащих в пределах,

которые укладываются все выполняемые

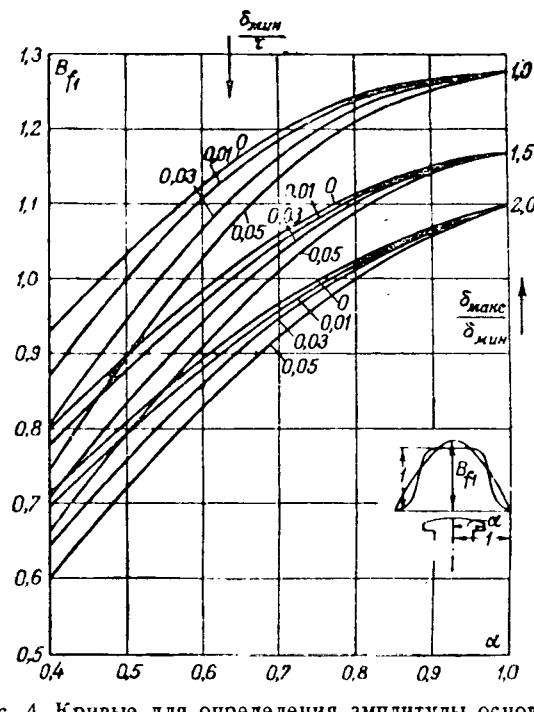


Рис. 4. Кривые для определения амплитуды основной волны потока возбуждения $B_{f_1} = f(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const}$.

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

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

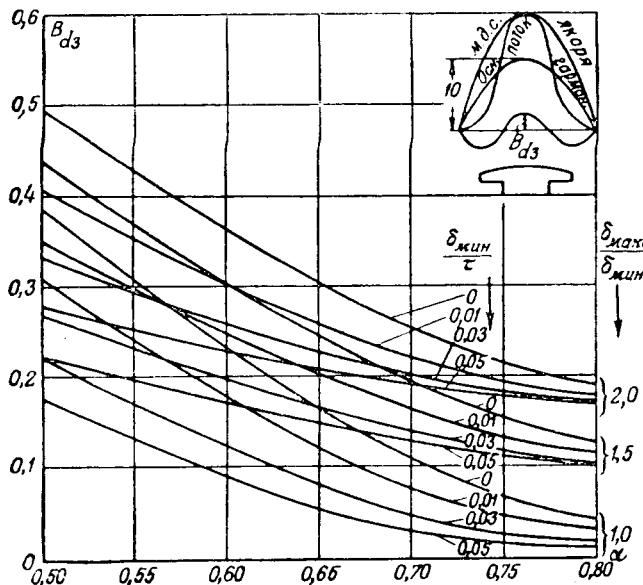


Рис. 5. Кривые для определения амплитуды третьей гармоники продольного поля якоря $B_{d_3} = f(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const}$.

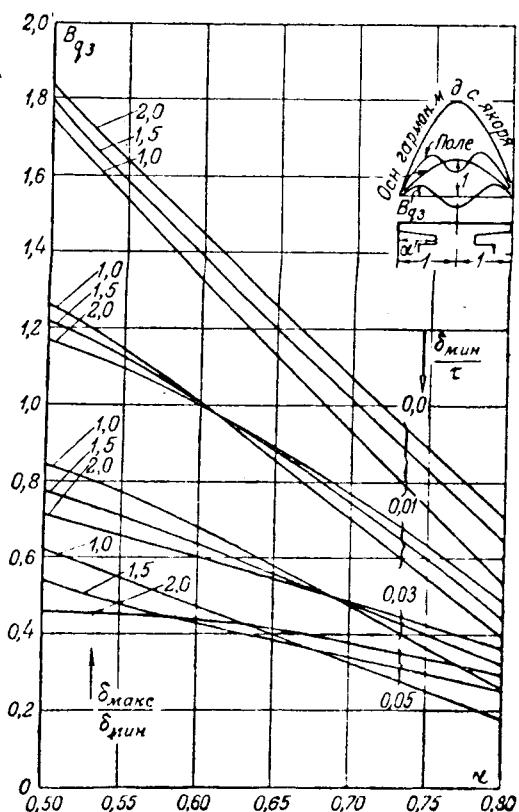


Рис. 6. Кривые для определения амплитуды третьей гармоники поперечного поля якоря $B_{q_3} = f(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const}$.

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.

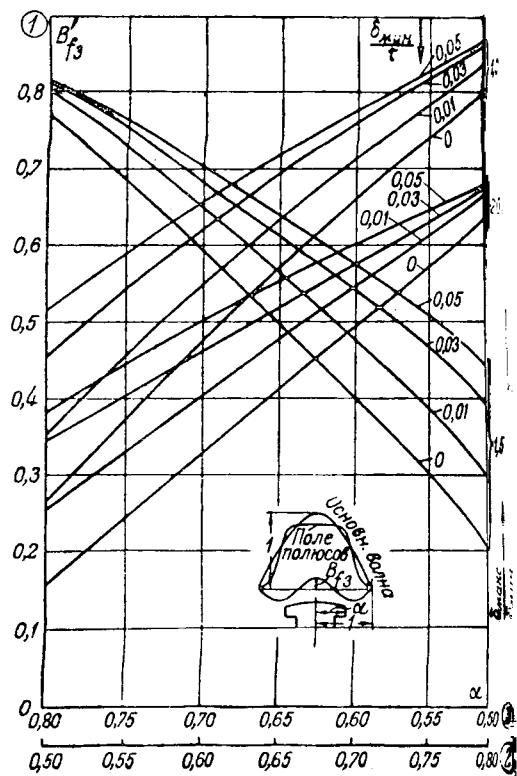


Рис. 7. Кривые для определения амплитуды третьей гармоники поля полюсов $B_{f_3} = f(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ и $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \text{const} = 1,0; 2,0; 1,5$ ($1 = f_3$) [$B_{f_1} = 0,6 - B'_{f_1}$].

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

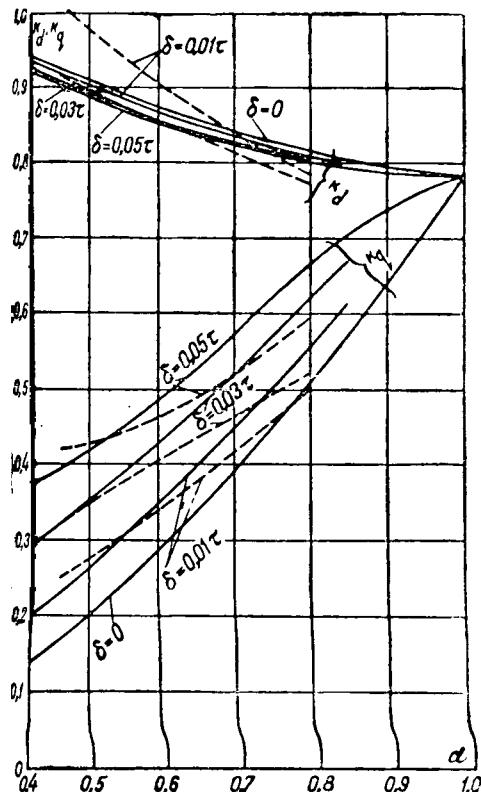
$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 1; 1,5; 2,0,$$

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

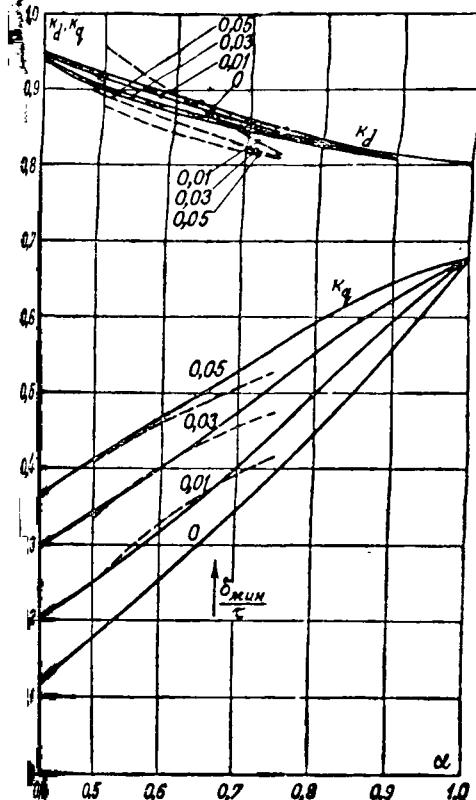
Выводы. 1. Кривые Виземана основаны на дополнительных допущениях, не указанных в работе.

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 входит в кривые Виземана.



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



Кривые коэффициентов $k_d = f(\alpha)$ и $k_q = \varphi(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ при $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 1,5$.

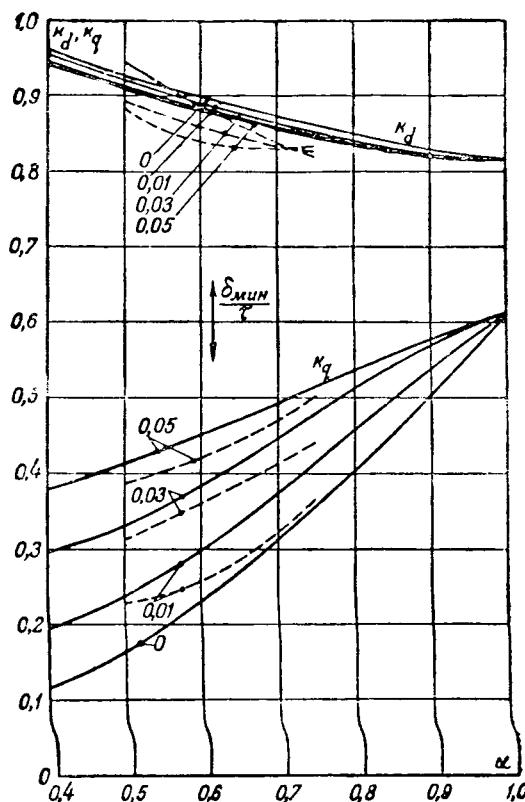


Рис. 10. Кривые коэффициентов $k_d = f(\alpha)$ и $k_q = \varphi(\alpha)$ для различных значений $\frac{\delta_{\min}}{\tau} = \text{const}$ при $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 2,0$.

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 ценным 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. Колпяев. 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. Lehmann. Peut-on remplacer une bobine induitrice par une spire équivalente par rapport à l'induit. Revue Générale de l'Électricité, p. 171—176, 6 février 1932.

[7. 8. 1950]

Уравнения переходных электромагнитных процессов асинхронного двигателя и их решения

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 мало удобны. Возникла необходимость в предложении уравнений непрерывно к более удобной системе координат.

Наиболее удобной такую систему координат, которая давала бы возможность вместо

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

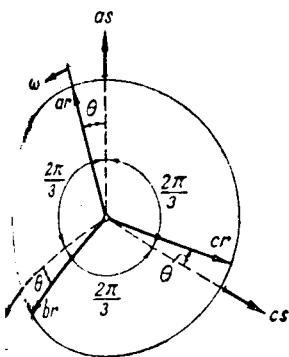
Некоторый шаг вперед в этом направлении представляют работы Е. Я. Казовского [Л. 5], В. А. Шубенко и И. С. Пинчука [Л. 8] и Н. А. Зонова [Л. 2]. Автор уже предлагал на страницах журнала «Электричество» [Л. 3] для этой следующее преобразование мгновенных величин:

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

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

2. Геометрический и физический смысл преобразования. В преобразовании (1,1) 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., симметричально 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.



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

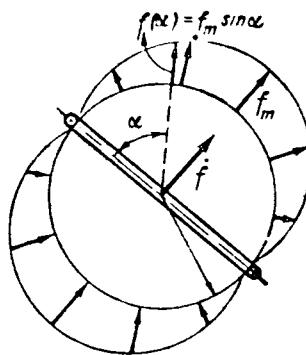


Рис. 2. Распределение магнитного поля одной обмотки по зазору и его векторное изображение.

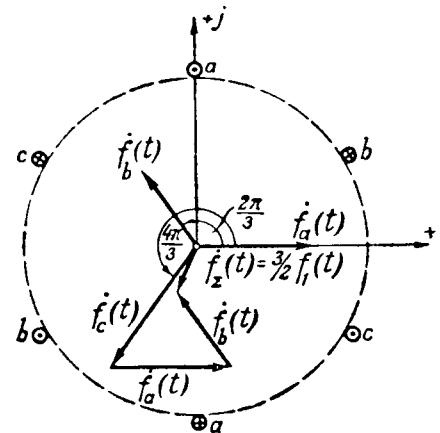


Рис. 3. Построение вектора $f_1(t)$.

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

Результирующая н. с. в зазоре, создаваемая в трех обмоток в любое мгновение, равна сумме н. с. отдельных обмоток, ее распределение по зазору машины также синусоидально. Известно, что сложение синусоид, разных по фазе в пространстве, можно заменить сложением векторов, сдвинутых в пространстве (рис. 3). Таким образом, подобно тому как вектор $f_a(t)$ 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 ввести две взаимно перпендикулярные оси плоскости рис. 3 и суммировать проекции векторов на эти оси. Еще целесообразнее оперирание с составляющими векторов по осям, векторами, как таковыми. Для этого достичь совместить с плоскостью рис. 3 плоскость комплексных чисел. При этом каждый вектор выразить комплексным числом с модулем, равным модулю вектора, и с аргументом, равным углу вещественной осью и данным вектором. Исключает возможности оперирования такими проекциями вектора на оси, которые в данном случае будут соответственно равны вещественной и мнимой частям комплексного числа, изображенного вектора.

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

$$\begin{aligned} \vec{f}_1 = \vec{f}_a + \vec{f}_b + \vec{f}_c &= f_a e^{j\theta} + f_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + f_c e^{j\frac{4\pi}{3}} = \\ &= f_a + \alpha f_b + \alpha^2 f_c. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Наш вектор отличается от этой лишь множителем k :

$$f_1 = k(f_a + \alpha f_b + \alpha^2 f_c). \quad (2.2)$$

Исходя из указанных представлений гармонической волны, то наиболее естественно положить $k=1$; если следовать канонической

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

1) при установленном режиме и симметричных синусоидальных фазных напряжениях или токах i_1 (или i_1) переходит в комплексный врачающийся вектор установленного режима [см. (2,7)];

2) вещественная и мнимая части i_1 и \dot{i}_1 представляют ортогональные составляющие i_a , i_b и i_c , \dot{i}_a , \dot{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 :

$$\vec{f}_2 = \vec{f}_1. \quad (2.3)$$

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 \vec{f}_2 . При отсутствии симметрии обмоток или магнитной симметрии приходится пользоваться обоими векторами: f_1 и $f_2 = \vec{f}_1$. 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

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c), \\ i_1 &= \frac{1}{3}(i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c), \\ i_2 &= \frac{1}{3}(i_a + \alpha^2 i_b + \alpha i_c). \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

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:

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

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 , врачающего момента T , механической мощности p_m , скорости накопления энергии в магнитном поле Dw , электрических потерь p_s и мощности двигателя p , примут вид:

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

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

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

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

причем:

$$\begin{aligned} S^{-1} &= \frac{4}{3} \tilde{S}; \quad S_t = S; \quad S \cdot \tilde{S} = \frac{3}{4} S S^{-1} = \frac{3}{4} I; \\ C^{-1} &= \frac{4}{3} \tilde{C}; \quad C_t = C; \\ C \cdot \tilde{C} &= \frac{3}{4} C \cdot C^{-1} = \frac{3}{4} \cdot 1. \end{aligned}$$

Напряжения и потокосцепления преобразуются к новым координатам подобно токам.

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

$$\begin{aligned} r' &= C^{-1} r C = \frac{4}{3} \tilde{C} r C; \quad L' = C^{-1} L C = \frac{4}{3} \tilde{C} L C; \\ u' &= r' i' + D\psi'; \quad \psi' = L' i'; \quad w = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} i_t' L' i'; \\ &= \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} i_t' \psi'; \quad T = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} i_t' \frac{\partial L}{\partial \theta} \cdot i'; \quad p_m = \omega T; \\ Dw &= \frac{3}{4} \psi_t' D i' + p_m; \quad p_s = -\frac{3}{4} i_t' r' i'; \\ p &= \frac{3}{4} u i'. \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} u_{0s} &= r_s i_{0s} + D\psi_{0s}; & u_{0r} &= r_r i_{0r} + D\psi_{0r}; \\ u_{1s} &= r_s i_{1s} + D\psi_{1s}; & u_{1r} &= r_r i_{1r} + D\psi_{1r}; \\ u_{2s} &= r_s i_{2s} + D\psi_{2s}; & u_{2r} &= r_r i_{2r} + D\psi_{2r}; \\ \psi_{0s} &= L_{0s} \cdot i_{0s}; & \psi_{0r} &= L_{0r} \cdot i_{0r}; \\ \psi_{1s} &= L_{1s} \cdot i_{1s} + M e^{j\Theta} i_{1r}; \\ \psi_{1r} &= L_{1r} \cdot i_{1r} + M e^{-j\Theta} \cdot i_{1s}; \\ \psi_{2s} &= L_{2s} \cdot i_{2s} + M e^{-j\Theta} i_{2r}; \\ \psi_{2r} &= L_{2r} i_{2r} + M e^{+j\Theta} \cdot i_{2s}; \end{aligned}$$

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

$$T = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} [i_{1s} j M \cdot e^{j\Theta} i_{1r} - i_{2s} j M \cdot e^{-j\Theta} \cdot i_{2r} - i_{1r} j M e^{-j\Theta} i_{1s} + j \cdot i_{2r} M e^{+j\Theta} \cdot i_{2s}]; \quad p_m = \omega T;$$

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

$$\begin{aligned} &= \frac{3}{4} [r_s (i_{0s}^* i_{0s} + i_{1s}^* i_{1s} + i_{2s}^* i_{2s}) + r_r (i_{0r}^* i_{0r} + \\ &\quad + i_{1r}^* i_{1r} + i_{2r}^* i_{2r})]; \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{3}{4} [u_{0s}^* i_{0s} + u_{1s}^* i_{1s} + u_{2s}^* i_{2s} + u_{0r}^* i_{0r} + u_{1r}^* i_{1r} + \\ &\quad + u_{2r}^* i_{2r}]. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Как симметрия устройства и приложенных движений, так и отсутствие нулевых проводников, каждое порознь, является достаточным условием отсутствия нулевых компонент. Поэтому их можно положить равными нулю. Учитывая, что $i_2 = i_1$, $\psi_2 = \psi_1$, $u_2 = u_1$, можно отбросить последние строки в (3.7) и (3.8), как выраженные предшествующим, а остальные равенства упростить. После этого получим:

$$i_{1s} = r_s i_{1s} + D\dot{\psi}_{1s}; \quad i_{1r} = r_r i_{1r} + D\dot{\psi}_{1r}; \quad (3.14)$$

$$-L_s i_{1s} + M e^{j\Theta} i_{1r}; \quad \psi_{1r} = L_r i_{1r} + M e^{-j\Theta} i_{1s}; \quad (3.15)$$

$$w = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot [i_{1s}^* \dot{\psi}_{1s} + i_{1r}^* \dot{\psi}_{1r}]; \quad (3.16)$$

$$T = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [i_{1s}^* j M e^{j\Theta} i_{1r}]; \quad p_u = \omega T; \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} Dw &= \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\psi_{1s}^* Di_{1s} + \psi_{1r}^* Di_{1r}] + p_u = \\ &= \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\psi_{1s}^* Di_{1s} + \psi_{1r}^* Di_{1r} + i_{1s}^* j \omega M e^{j\Theta} i_{1r}]; \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$p_s = \frac{3}{2} [r_s |i_{1s}|^2 + r_r |i_{1r}|^2]; \quad (3.19)$$

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [u_{1s}^* i_{1s} + u_{1r}^* i_{1r}]. \quad (3.20)$$

Уравнения можно еще упростить, применив преобразование поворота.

Преобразование поворота. Вещественная ось на статоре была выбрана в § 3 совпадающей с as , а вещественная ось на роторе — 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 вращения комплексных осей статора и ротора желательно повернуть оси ротора на $-(-\Theta)$. Тогда оси статора и ротора будут уже неподвижны в пространстве. В ряде случаев удобно взаимно неподвижные системы статора и ротора вращать с угловым движением $\Theta_k(t)$ и скоростью $\omega_k = D\Theta_k$. Обе эти операции можно выразить одним математическим преобразованием:

$$i_s = i_{1s} e^{-j\Theta_k}; \quad i_r = i_{1r} e^{+j\Theta_k} e^{+j\Theta};$$

$$i_s = i_{1s} e^{+j\Theta_k}; \quad i_{1r} = i_{1r} e^{+j\Theta_k} e^{-j\Theta}; \quad (4.1)$$

при этом

$$Di_{1s} = e^{j\Theta_k} (D + j\omega_k) i_s;$$

$$Di_{1r} = e^{j(\Theta_k - \Theta)} (D + j\omega_k - j\omega) i_r; \quad (4.2)$$

где

$$\omega_k = D\Theta_k; \quad \omega = D\Theta. \quad (4.3)$$

Аналогично преобразуются напряжения и потокосцепления. Подставляя (4.1) и (4.2) в (3.14)–(3.20), находим:

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

$$i_r = r_r i_r + (D + j\omega_k - j\omega) \dot{\psi}_r; \quad (4.4)$$

$$\dot{\psi}_s = L_s i_s + M i_r; \quad \dot{\psi}_r = L_r i_r + M i_s; \quad (4.5)$$

$$w = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot [\dot{\psi}_s^* i_s + \dot{\psi}_r^* i_r]; \quad (4.6)$$

$$T = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [i_s^* j M i_r] = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\psi_s^* j i_s^*]; \quad p_u = \omega T; \quad (4.7)$$

$$Dw = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\dot{\psi}_s^* Di_s + \dot{\psi}_r^* Di_r]; \quad (4.8)$$

$$p_s = \frac{3}{2} [r_s |i_s|^2 + r_r |i_r|^2]; \quad (4.9)$$

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [i_s^* i_s + i_r^* i_r]. \quad (4.10)$$

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 взаимно неподвижных 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:

$$i_0 = I_{s_{\max}}; \quad u_o = U_{s_{\max}}. \quad (5.1)$$

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

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

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 врачающего 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:

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

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

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

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

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

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

$$P = \operatorname{Re}[\dot{u}_s^* i_s + u_r^* i_r]. \quad (5,14)$$

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

$$P = P_s + P_u + Dw. \quad (5,15)$$

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 формулах, приведенных выше, фигурируют как так и потокосцепления. Можно исключить потокосцепления с помощью (5,9), либо с помощью зависимости обратной (5,9), а тут

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

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

После исключения потокосцеплений основной зависимостью примут вид:

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

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

$$T = \operatorname{Re}[i_s^* j x_m i_r] = x_m \operatorname{Im}[i_r^* i_s].$$

При исключении токов основные уравнения примут вид:

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

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

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

Ниже показано, что эти уравнения все полезны при решении задач без учета активного сопротивления статора, так как непосредственно интегрируются в квадратурах (см. § 8). Разделяющие вещественные и мнимые части в (5,8), (5,9), (5,11), легко найти уравнения:

$$u_{as} = r_s i_{as} + D \Phi_{as} - \omega_k \Psi_{bs};$$

$$u_{as} = r_s i_{bs} + D \Phi_{bs} + \omega_k \Psi_{as};$$

$$u_{ar} = r_r i_{ar} + D \Phi_{ar} - (\omega_k - \omega) \Psi_{br};$$

$$u_{br} = r_r i_{br} + D \Phi_{br} + (\omega_k - \omega) \Psi_{ar};$$

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

$$\Psi_{bs} = x_s i_{bs} + x_m i_{br};$$

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

$$\Psi_{br} = x_m i_{bs} + x_r i_{br};$$

$$T = \Psi_{as} i_{bs} - \Psi_{bs} i_{as};$$

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

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

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

$$Z_{rs} I_s + Z_{rr} I_r = \check{U}_r,$$

$$\begin{aligned} Z_s &= r_s + x_s(p + j\omega_k); \quad Z_{sr} = x_m(p + j\omega_k); \\ Z_r &= x_m(p + j\omega_k - j\omega); \quad Z_{rr} = r_r + \\ &+ x_r(p + j\omega_k - j\omega). \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= U_s + \psi_s(0)p; \quad \dot{U}_r = U_r + \psi_r(0)p; \\ U_s &\doteq u_s e^{-j\omega_k t}; \quad U_r \doteq u_r e^{-j\omega_k t} \cdot e^{+j\omega t}. \end{aligned}$$

Уравнения легко решаются в явном виде относительно операторных токов:

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{1}{\sigma x_s H(p)} \left[(a_r + p + j\omega_k - j\omega) \dot{U}_s - \right. \\ &\quad \left. - k_r(p + j\omega_k) \dot{U}_r \right]; \\ I_r &= \frac{1}{\sigma x_r H(p)} \cdot \left[-k_s(p + j\omega_k - j\omega) \dot{U}_s + \right. \\ &\quad \left. + (a_s + p + j\omega_k) \dot{U}_r \right], \end{aligned} \quad (7.3)$$

$$\begin{aligned} H(p) &= p^2 + [j(2\omega_k - \omega) + a'_r + a'_s]p + \\ &- [a'_r a'_s - \omega_k(\omega_k - \omega) + j(\omega_k - \omega)a'_s + j\omega_k a'_r]. \end{aligned} \quad (7.4)$$

Многочлены $H(p)$ равны:

$$p_{12} = \frac{1}{2} \left\{ -[a'_r + a'_s + j(2\omega_k - \omega)] \pm \right. \\ \left. \pm \sqrt{(a'_r - a'_s - j\omega)^2 + 4a'_r a'_s k} \right\}. \quad (7.5)$$

В первом случае при $\omega_k = \omega_s$; $\psi_s(0) = 0$; $\psi_r(0) = 0$ уравнения (6.4), (6.5) совпадают с уравнением Казовского [Л. 1].

При любых начальных условиях и при любых напряжениях, состоящих из постоянных, гармонических 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

При необходимости определения всех других энергетических величин, достаточно пользоваться формулами (5.9), (5.10), (5.12), (5.14).

В случае включения симметричной системы синусоидальных напряжений во вращающийся двигатель, в котором отсутствуют токи и обмотка замкнута, достаточно положить $\omega_k = \omega_s = 1$ и $\psi_s(0) = 0$, после чего получится операторное решение, рассмотренное автором в [Л. 3, задача (11)].

Раскрывая операторные токи по теореме разложения, легко найти:

$$i_s = \frac{\dot{U}}{\sigma x_s} \left[\frac{a_r + js}{p_1 p_2} + \frac{a_r + p_1 + js}{p_1(p_1 - p_2)} e^{p_1 t} - \right. \\ \left. - \frac{a_r + p_1 + js}{p_2(p_1 - p_2)} e^{p_2 t} \right]; \quad (7.6)$$

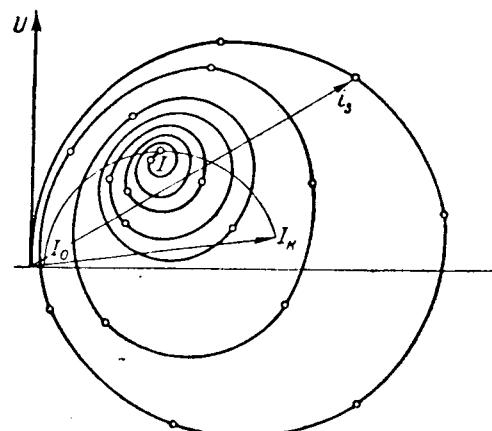


Рис. 4. Спираль, описываемая вектором i_s при включении $U = U_{\text{отн}}$ и постоянном скольжении $S = 0,068$.

$$i_r = \frac{\dot{U}(-k_s)}{\sigma x_s} \left[\frac{js}{p_1 p_2} + \frac{p_1 + js}{p_1(p_1 - p_2)} e^{p_1 t} - \right. \\ \left. - \frac{p_1 + js}{p_2(p_1 - p_2)} e^{p_2 t} \right]. \quad (7.7)$$

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 $\omega_a = 0$ 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:

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

Таким образом, известная зависимость уставившегося 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:

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

Аналогично выражаются матрицы тока и потокосцеплений.

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

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

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):

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

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

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

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

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

$$L'_{rs} = (L'_{sr})_t.$$

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

$$\frac{\partial L'_{rs}}{\partial \theta} = \left(\frac{\partial L'_{sr}}{\partial \theta} \right)_t.$$

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;

$L_s(L)$ — индуктивность одной фазы статора (ротора);

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

m — наибольшая индуктивность между одной фазой ротора и статором;

$L_{sr} = L_s + 2m_s$ ($L_{or} = L_r + 2m_r$) — индуктивность нулево-последовательности статора (ротора);

$L_{sr} = L_s - m_s$ ($L_{or} = L_r - m_r$) — индуктивность прямой последовательности статора (ротора);

$\frac{3}{2}m$ — трехфазный коэффициент взаимной индукции статора и ротора;

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

ши 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. Сazonov. 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. Klop. 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

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

сводится к несложной задаче интегрирования одного из следующих двух уравнений:

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

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

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

$$I(x) = I_2 + \int_0^x Y_0(\xi) \dot{U}(\xi) d\xi, \quad (5)$$

где \dot{U}_2 и I_2 —напряжение и ток на приемном конце линии — предполагаются известными.

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

и т. д. Вологодская областная универсальная научная библиотека

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. времем более или менее произвольно вид зависимости $\dot{U}(x)$. Подставив выражение $\dot{U}(\xi)$ в правую часть уравнения (5) и числив соответствующий интеграл, мы получим приблизительное разделение тока вдоль линии. Найденное выражение подставляется в правую часть уравнения, после чего, проделав требуемые вычисления, получаем следующее приближение для искомой функции $\dot{U}(x)$. 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 $I(x)$. 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 всегда 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

$$\begin{aligned} \dot{U}(x) &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \nu x + i_2 Z_c \operatorname{sh} \nu x, \\ i(x) &= i_2 \operatorname{ch} \nu x + \dot{U}_2 Y_c \operatorname{sh} \nu x, \end{aligned} \quad (6)$$

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.

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

При постоянном волновом сопротивлении

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

тогда (2) может быть проинтегрирована, именно:

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

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

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:

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

Сообщено $\nu^2 = a^2 + ab$.

Покажем применение указанного способа на примере. Пусть $Z_0 = j300(1+2x)$, $Y_0 = j0,1e^{-1,1x}$,

$$l=1, \quad \dot{U}_2=100, \quad i_2=1,$$

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

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

то время как в однородной линии они равны единице.

Итак, сопротивление линии возрастает по ее длине, а проводимость уменьшается. Сходную неоднородность 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 этого приближения

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

наименьшей. Дифференцируя выражение (12) и приравнивая результат нулю, находим:

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

Степень полученного приближения дает по 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

$$\dot{U}_1(x) = e^{0,55x} [100 \cos 5,69x + (j57,5 - 9,7x) \sin 5,69x].$$

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.

$$i_1(x) = e^{-0,55x} [\cos 5,69x + (j1,758 + 0,097) \sin 5,69x].$$

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	$\dot{U}_1(x)$		$\dot{U}_{II}(x)$	
	модуль	аргумент	модуль	аргумент
0	100	0	100	0
0,1	90	$21^\circ 20'$	89,5	$20^\circ 25'$
0,2	69	$57^\circ 35'$	68	57°
0,3	72,5	$112^\circ 10'$	73	$114^\circ 40'$
0,4	105	$148^\circ 40'$	110	$151^\circ 20'$
0,5	131	$170^\circ 20'$	140	$172^\circ 30'$
0,6	132	$169^\circ 22'$	143	$191^\circ 07'$
0,7	108	$215^\circ 50'$	118	$216^\circ 20'$
0,8	89	$263^\circ 30'$	97	$259^\circ 25'$
0,9	118	$312^\circ 40'$	117	$306^\circ 30'$
1,0	163	340°	153	$334^\circ 40'$

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

Свирьстрой

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:

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

$$dU = -z dI - \beta I ds,$$

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

$$dU = z dI - \beta I ds;$$

здесь s — координата, отсчитанная по 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:

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

$$s - s_\Omega = -a(t - t_\Omega). \quad (2)$$

Индексами W и Ω обозначены некоторые произвольные начальные точки ($s = s_w$, $t = t_w$ и $s = s_\Omega$, $t = t_\Omega$). Вдоль характеристик семейства (1'), соответствующих распространению волн в положительном направлении s (эти характеристики будем называть положительными), выполняется уравнение

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

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

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

$$U - U_{\Omega} = z(I - I_{\Omega}) - \beta \int_{s_{\Omega}}^s Ids. \quad (4)$$

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

$$\begin{cases} s - at = \text{const}, \\ U + zI = \text{const}, \end{cases} \quad (5)$$

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

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:

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

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

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

$$U - (z + \rho_{\Omega})I = Q_{\Omega}. \quad (9)$$

Здесь введены обозначения³

$$\begin{cases} R_w = U_w + (z - \rho_w)I_w, \\ Q_{\Omega} = U_{\Omega} - (z - \rho_{\Omega})I_{\Omega}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \rho_w = \frac{1}{2}\beta(s - s_w), \\ \rho_{\Omega} = \frac{1}{2}\beta(s_{\Omega} - s). \end{cases} \quad (10')$$

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

Общая схема расчета методом характеристик. Рассмотрим пример сложной линии (рис. 1, а). Сечение I линии является граничным сечением, сечение II — сечением смыкания участков A и B, характеризуемых, соответственно, постоянными z_A, ρ_A, a_A и z_B, ρ_B, a_B и сечение III — вторым граничным сечением. Введем в рассмотрение плоскость s, t (рис. 1, б). Совокупность координат

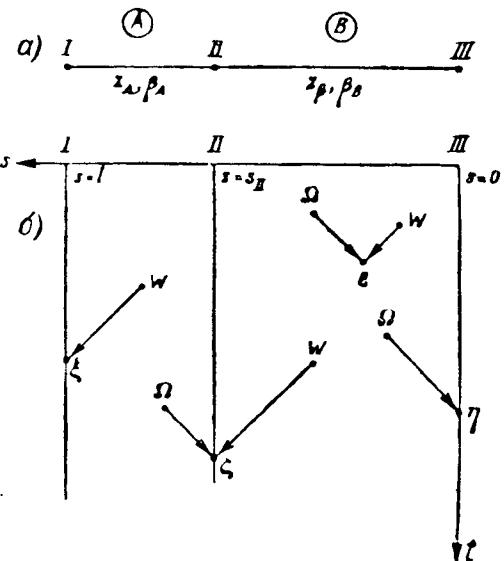


Рис. 1

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 τ . 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 обеим уравнениям. Решая их совместно, найдем:

$$U = \frac{R_w(z + \rho_{\Omega}) + Q_{\Omega}(z + \rho_w)}{2z + \rho_w + \rho_{\Omega}}, \quad (11)$$

$$I = \frac{R_w - Q_{\Omega}}{2z + \rho_w + \rho_{\Omega}}. \quad (12)$$

Здесь z и ρ — 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:

$$\begin{cases} I_{II, A} = I_{II, B} = I_{II}, \\ U_{II, A} = U_{II, B} = U_{II}. \end{cases} \quad (13)$$

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

⁴ Заметим для отрицательной характеристики

$a = -a$ и $s < s_{\Omega}$.

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:

$$U = \frac{R_W(z_A + p_\Omega) + Q_\Omega(z_B + p_W)}{z_A + z_B + p_\Omega + p_W}, \quad (15)$$

$$I = \frac{R_W - Q_\Omega}{z_A + z_B + p_W + p_\Omega}. \quad (16)$$

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

Границная 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

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

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

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

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 которых соединяются различные участки, и дополнительные расчетные сечения — римскими цифрами I, II, III, \dots . Если имеются ответвления, то система нумерации та же для каждого ответвления добавляется соответствующий индекс, например, A_1, B_1, \dots . Каждый участок линии характеризуется постоянными z_n, p_n и временем пробега волны по данному участку (полуфазе): $\mu_n = \frac{t_n}{a_n}$. Расчет значений 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 делитель всех полуфаз $\mu_A, \mu_B, \dots, \mu_K$.

Пусть, например, линия состоит из трех участков A, B и C . При этом $\mu_B = 1,41 \mu_A$: $= 2,18 \mu_A$. 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 $\nu_A = 5, \nu_B = 7$ и $\nu_C = 11$. 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 изображены створы I, II, III, \dots , указаны участки A, B, C, \dots и выписаны значения постоянных z_n, p_n каждого из участков. На схеме наносятся горизонтальные линии, соответствующие моментам $\tau = 0, 1, 2, \dots$. Далее, на подготовленной таким образом схеме наносим линию, соответствующую распространению первой волны. Если волна прошла 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 будем

$p_n = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{g_n l_n}{l_n r_n} \right) r_n l_n$. В тех случаях, когда сопро-

тивление по величине с z (напомним, что для линии без сопротивления $p = 0$), для увеличения точности расчета данного участка линии следует разбить на ряд более мелких участков. Вводимые, таким образом, расчетные сечения будем называть дополнительными сечениями. Расчет этих сечений производится по уравнениям (11) и (12).

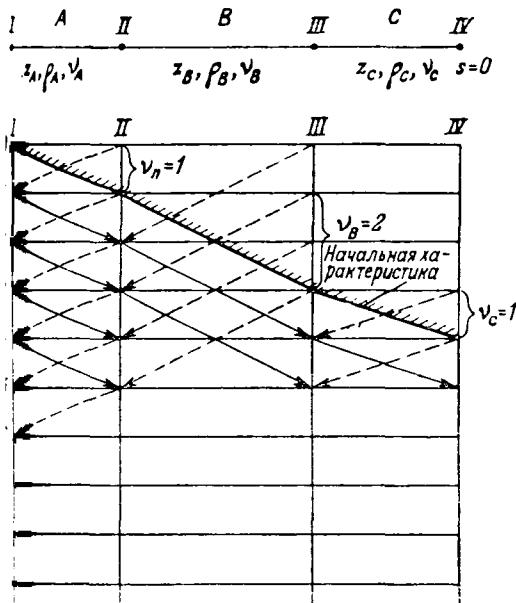


Рис. 2.

и II, еще через $\tau = v_B$ — до створа III

ведем следующую запись: $U_{N,\tau}$ и $I_{N,\tau}$. Это то, что данная величина U или I относится к сечению в момент τ . Совокупность индексов N, τ будем называть точкой. Например, III, 5 указывает на III створ в момент $\tau = 5$.

На всех точках (N, τ) , лежащих выше проводимой линии распространения первой волны, τ не производится, так как в них еще не наступил начальный заданный режим.

Далее были получены зависимости, которые в виде можно записать так:

$$\begin{aligned} U_{N,\tau} &= f_1(R_{N+1, \tau-v_B}; Q_{N-1, \tau-v_A}), \\ I_{N,\tau} &= f_2(R_{N+1, \tau-v_B}; Q_{N-1, \tau-v_A}). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь при R и Q указывают на соответствие исходные точки (рис. 3). Конкретное значение зависимостей f_1 и f_2 определяется данной точкой (см. выше).

Чтобы рассчитываться последовательно, идя по горизонтали от сечения I к сечениям II, III, IV. Ход расчета поясним применительно к 2. Предположим, что при начальном решении $u=0$ и $i=0$. Для сечения I граничное условие, например, задано в виде $u=mt$, где m — const. Переходя к τ и U , для этого сечения имеем:

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

$$m_1 = m T_p$$

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

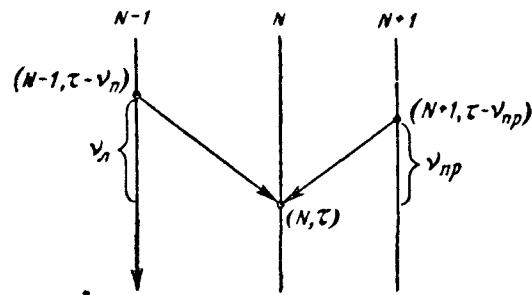


Рис. 3.

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 необходимые расчетные зависимости типа (1). Для точек, 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

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

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:

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

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

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

Вписываем численные величины $U_{I,I}$ и $I_{I,I}$ в таблицу. Для точек, лежащих на линии I, величины R 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				
\vdots					

Рис. 4.

дить только отрицательные характеристики, которым соответствуют величины Q . Поэтому значение $R_{1,1}$, прочеркивается, величина же Q применительно к сечению I определяется согласно (19):

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

Для точки I, 1 имеем:

$$Q_{1,1} = R_{1,1} - 2z_A I_{1,1} = -2z_A I_{1,1}.$$

Величина $I_{1,1}$ определена выше. На этом расчет точки I, 1 заканчивается. Совершенно аналогично рассчитываем точку I, 2. Для этой точки исходной будет точка II, 1. Рассчитываем точку II, 2. Для этой точки исходными будут точки I, 1 и III, 0. Значения $I_{1,2}$ и $U_{1,2}$ определяем из уравнений (б), 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, 1). 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:

$$\begin{aligned} -\frac{du}{ds} &= ri + L \frac{di}{dt}, \\ -\frac{di}{ds} &= gu + C \frac{du}{dt}; \end{aligned}$$

здесь i — ток;
 u — напряжение;
 s — координата, отсчитанная по длине линии;
 t — время.

Введем, как обычно при расчете длинных линий, новые функции

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

Относительно функций U и I при $\alpha = -\frac{g}{r}$ уравнения (A) запишутся в виде:

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

здесь

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

С учетом тождественных соотношений

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

Уравнения (C) приведем к виду:

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

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 характеристики (1) и (2).

Литература

1. С. А. Христианович, С. Г. Михлин. Б. Д. Девисон. Некоторые новые вопросы механики сплошной среды. АН СССР, 1938.
2. Н. Т. Мелешенко. Общий метод расчета гидравлического 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

Пожижения в области выпрямления высокочастотных ртутных выпрямителей расширили возможности решения проблемы выбора системы для электрической

изменение ртутного выпрямителя на электротом

ает возможность не только использовать его в качестве выпрямителя, но и для обратного преобразования — инвертирования постоянного тока в переменный. Инвертор работает изолированно от земляющей сети переменного тока, и все активные мощности покрываются за счет конденсаторов или же для покрытия реактивной мощности используются синхронные машины.

Изменение инверторов с конденсаторной или полной коммутацией позволяет осуществить инвертирование постоянного тока высокого напряжения (например, 20 кВ) в контактной сети с двигателем переменного тока на электровозе. Если же имеющиеся переменные напряжения выпрямлены можно создать систему постоянного тока для напряжения в контактной сети с двигателем постоянного тока на электровозе. Здесь же рассмотрены полностью статические преобразователи с конденсаторной коммутацией.

В настоящей статье кратко рассмотрены некоторые вопросы теории многофазных инверторов, составленной автором.

Инвертирование постоянного тока в трехфазном схеме «звезда-звезда». Кратко работа инвертора происходит следующим образом. Если открыть, например, вентиль 1 (рис. 1), то плюс источника пройдет через фазу I первичной обмотки трансформатора, вентиль 1, катодное дроссельное сопротивление L_d , к минусу источника. Возникающие при этом э. д. с., обусловленные индуктивностью фаз, I, II, III, заряжают конденсаторы до такого значения, что по прошествии $\frac{1}{3}$ периода, когда открывается вентиль 2, конденсаторы, разряжаясь, гасят вентиль 1. Перезарядившись, они получают напряжение такой полярности, что при открытии по ис-

пользованию формулы для определения напряжения инвертора при активно-индуктивной нагрузке и различных схемах. Даются выражения для определения времени, предоставляемого для демонстрации вентилей. Выводятся расчетные формулы для типовой мощности конденсаторов. Устанавливается функциональная зависимость типовой мощности трансформатора от параметров схемы. Выводятся уравнения, определяющие внешнюю характеристику инвертора.

течении $\frac{2}{3}$ периода вентиля 3 они, разряжаясь, гасят вентиль 2 и т. д.

При таком процессе во вторичной обмотке возникает трехфазное напряжение.

Образование инверторного напряжения при активно-индуктивной на-

грузке. В реальной схеме конденсаторы подключены так, как это показано на рис. 1. Но конденсаторы также можно подключить и на вторичной стороне трансформатора, соединив их звездой или в треугольник. Однако подключение конденсаторов на первичной стороне имеет то достоинство, 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 трансформатора (рис. 2). В действительной схеме конденсаторы на первичной стороне соединены в треугольник, а на вторичной стороне мы соединяем их в звезду. Для сохранения действительных соотношений при расчете следует поэтому исходить из формы преобразования треугольника в звезду. Принимая коэффициент трансформации равным единице, имеем:

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

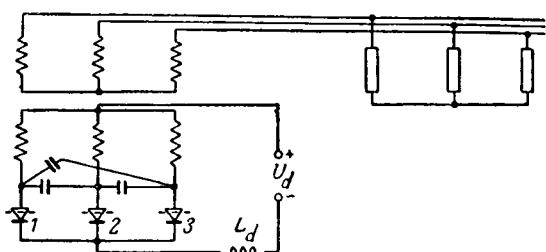


Рис. 1. Принципиальная схема трехфазного инвертора, соединенного по схеме звезда-звезда.

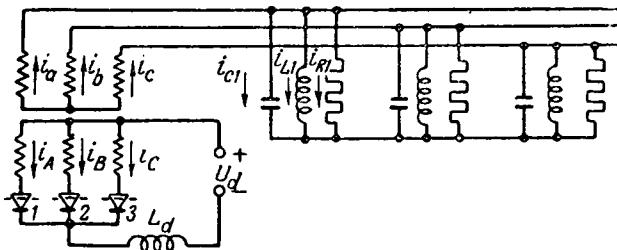


Рис. 2. Расчетная схема трехфазного инвертора, соединенного по схеме звезда-звезда.

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 вентиляй 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 вентиляй, 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 1.

Время работы вентиля 1 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 $i_A = i_a$,

$i_B = 0$; $i_C = 0$, 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:

$$i_{R_1} + i_{L_1} + i_{C_1} = \frac{2}{3} I_d;$$

$$i_{R_2} + i_{L_2} + i_{C_2} = -\frac{1}{3} I_d;$$

$$i_{R_3} + i_{L_3} + i_{C_3} = -\frac{1}{3} I_d;$$

здесь i_{R_1} , i_{R_2} , i_{R_3} — соответственно токи в фазах звезды в активном сопротивлении фаз; i_{L_1} , i_{L_2} , i_{L_3} — в индуктивностях фаз; i_{C_1} , i_{C_2} , i_{C_3} — в емкостях фаз I, II, III.

Из (5) получаем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u_1}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{du_1}{dt} + \frac{1}{LC} u_1 &= 0, \\ \frac{d^2 u_2}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{du_2}{dt} + \frac{1}{LC} u_2 &= 0, \\ \frac{d^2 u_3}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{du_3}{dt} + \frac{1}{LC} u_3 &= 0. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} u_1 + u_2 + u_3 &= 0, \\ i_{L_1} + i_{L_2} + i_{L_3} &= 0, \\ |u_3|_{t=-\frac{t_0}{2}} &= |u_1|_{t=\frac{t_0}{2}}, \\ |u_1|_{t=-\frac{t_0}{2}} &= |u_2|_{t=\frac{t_0}{2}}, \\ |i_{L_3}|_{t=-\frac{t_0}{2}} &= |i_{L_1}|_{t=\frac{t_0}{2}}, \\ |i_{L_1}|_{t=-\frac{t_0}{2}} &= |i_{L_2}|_{t=\frac{t_0}{2}}. \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

k_1 определяются из характеристического уравнения

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

Для характеристического уравнения k_1 и k_2 быть действительными, сопряженными комплексами или равными. В первом случае напряжение между двумя коммутациями изменяется для фазы апериодически, во втором случае — место колебания. В третьем случае мы границу апериодической области изменения напряжений. Обозначим:

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

Согласно решению характеристического уравнения имеем:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{2CR}, \quad c' = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad d = \sqrt{a^2 - (c')^2}, \\ b &= \sqrt{(c')^2 - a^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда как мы установим связь между I_a параметрами нагрузки, исходя из того, что

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

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

$$\begin{aligned} u_1 &= U_d \frac{(c't_0)^2}{2} e^{-at} \times \\ &\quad \left. \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right) \cos bt_0 + 2e^{\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t - \frac{t_0}{2} \right) \cos bt_0 + e^{\frac{3}{2}at_0} \sin b \left(-t - \frac{t_0}{2} \right) + e^{-\frac{3}{2}at_0} \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right) \right\} \\ &= U_d \frac{(c't_0)^2}{2} e^{-at} \left\{ \frac{-e^{-\frac{3}{2}at_0} \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right) - e^{\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t - \frac{3}{2}t_0 \right) - e^{-\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t - \frac{t_0}{2} \right)}{at_0 \sin 2bt_0 + at_0 \sin bt_0 \operatorname{ch} at_0 - bt_0 \cos bt_0 \operatorname{sh} at_0 - bt_0 \sin 2at_0} \right\}, \\ &= U_d \frac{(c't_0)^2}{2} e^{-at} \left\{ \frac{-e^{\frac{3}{2}at_0} \sin b \left(-t - \frac{t_0}{2} \right) - e^{\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t + \frac{t_0}{2} \right) - e^{-\frac{at_0}{2}} \sin b \left(-t + \frac{3}{2}t_0 \right)}{at_0 \sin 2bt_0 + at_0 \sin bt_0 \operatorname{ch} at_0 - bt_0 \cos bt_0 \operatorname{sh} at_0 - bt_0 \sin 2at_0} \right\}; \end{aligned} \quad (12)$$

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

Приведя доказательства, укажем, что полученные формулы для напряжений всех трех фаз,енные для трети периода t_0 , дают, однако, одно и то же напряжение любой фазы за весь $T = 3t_0$.

Понятие о коэффициенте загрузки

$$B = \frac{1}{z \cdot C} \quad (13)$$

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:

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

Для иллюстрации на рис. За 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. Порядок

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

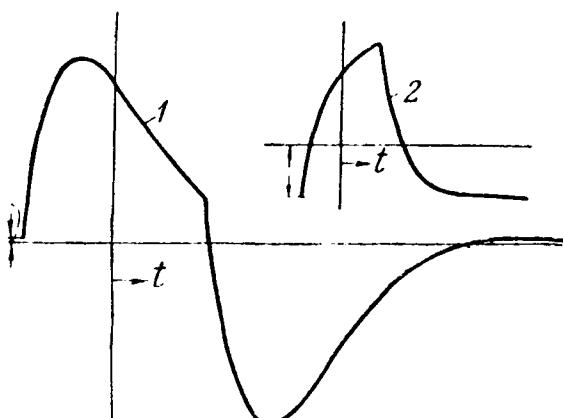


Рис. 3а. Расчетные кривые фазного напряжения инвертора.

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

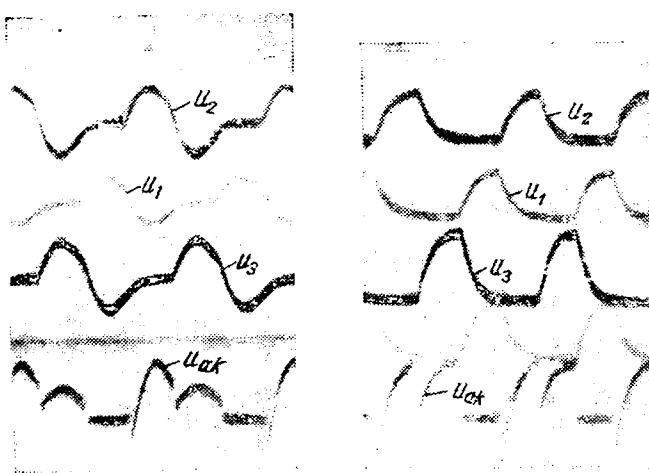


Рис. 3б. Осциллограмма кривых фазового напряжения, а также напряжения на вентилях инвертора при активно-индуктивной нагрузке.

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

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

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

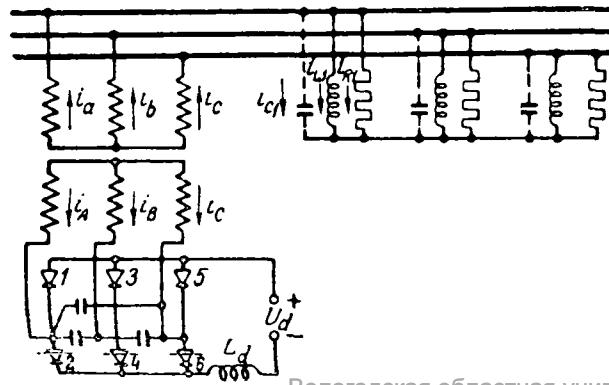


Рис. 4. Расчетная схема трехфазного мостового инвертора.

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

Порядок чередования вентиляй и фаз мостового инвертора

Интервал	Работающие		Интервал	Работающие
	вен-	фазы		тили
1	2	3	1	4 и 5
От $-\frac{t_0}{2}$ до $\frac{t_0}{2}$	2 и 3	I и III	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 одного напряжения в постоянный ток другого напряжения.

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 вентили 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:

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

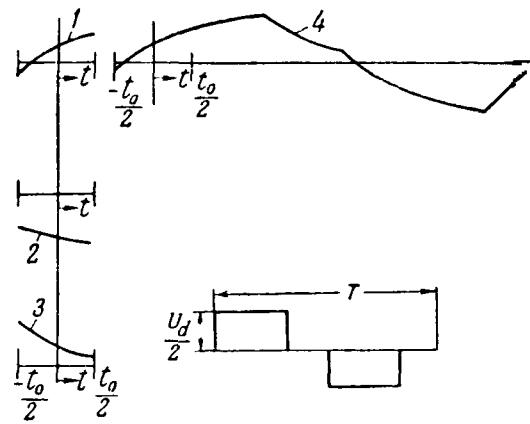


Рис. 5. Принципиальные кривые напряжения мостового инвертора при активной нагрузке.

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

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

для рассматриваемого случая имеют местоующие граничные условия:

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

После постоянные интегрирования и установившуюся 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:

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

Когда корни — сопряженные комплексы,

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

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

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:

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

На рис. 6, 1 дана рассчитанная кривая инверторного напряжения. Сравнение этой кривой с рис. 3, а показывает резкое уменьшение высших гармонических в кривой напряжения, полученного только за счет схемы соединения, но за счет увеличения числа коммутаций вентилей за период с 3 до 6. Вологодская областная научная библиотека № 0,264 (2).

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 коммутаций вентилей приводит к улучшению фазного напряжения. Имея формулы для определения напряжений, легко получить формулы для токов.

Параметры схемы и нагруженность инвертора. В несамоуправляемом 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.

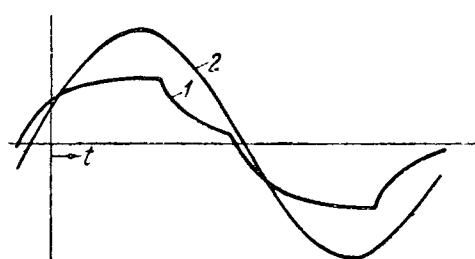


Рис. 6. Расчетные кривые фазного напряжения мостового инвертора при активной нагрузке и $B=2,01$ (1) и при активно-индуктивной нагрузке, $B=0,836$, при фазе 0,264 (2).

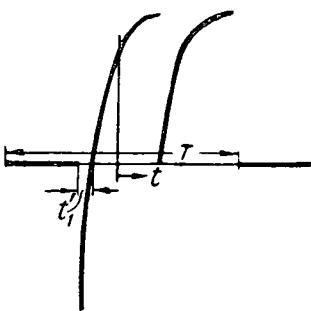


Рис. 7. Напряжение на вентилях 3 инвертора, соединенного по трехфазной схеме звезда-звезда.

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_{ak} вентиля, закончившего свою работу, имеет отрицательное значение. Предварительно следует найти время прохождения напряжения u_{ak} через нуль. Напряжение между анодом и катодом u_{ak} может быть определено из следующих соображений.

В момент времени $-\frac{t_0}{2}$ происходит коммутация 6 и 2 вентилями (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

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

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

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

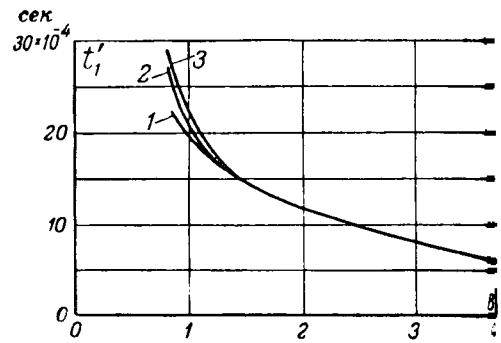


Рис. 8. Зависимость времени, предоставленное для деионизации, от коэффициента загрузки при активной нагрузке.

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

Время, предоставленное 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 активной нагрузки получим, если подставим значения u_1 и u_3 из (19) в (20). Для случая, когда корни — сопряженные комплексы, имеем:

Для иллюстрации на рис. 8 даны время, считанное по формуле (21), предоставленное 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 типичной мощности 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 получим, если умножить действующее значение фазного тока вторичной обмотки трансформатора $I_{(1)}$ на кажущееся сопротивление вторичной обмотки z_0 . Коэффициент искажения кривой фазного тока вторичной обмотки трансформатора, определяемый как отношение действующего значения первой гармоники к действующему значению кривой тока, составляет: $\frac{I_{(1)}}{I} = 0,955$. Поэтому

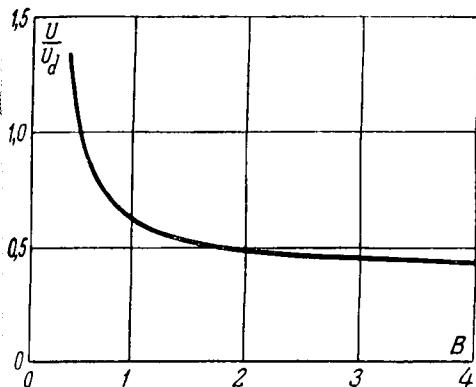


Рис. 9. Внешняя характеристика мостового инвертора при активной нагрузке.

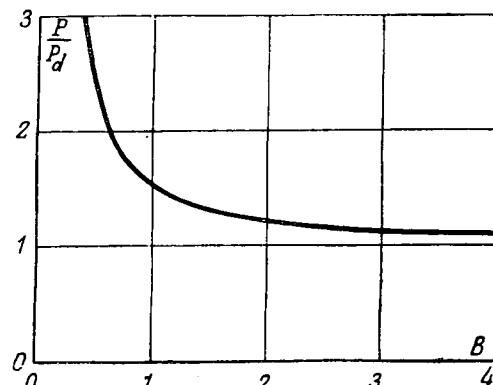


Рис. 10. Характеристика типовой мощности мостового инвертора при активной нагрузке.

ет рассмотрена только первая гармоника токов, то тогда, что действующее значение первой гармоники тока равно действующему значению всей волны тока. Таким образом, $U=Iz_0$. С другой стороны напряжение инвертора может быть выражено как произведение тока нагрузки на сопротивление: $U=I_R R$. Сравнивая эти выражения и преобразуя, получаем:

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

где $f(B)$ находят при определении $R I_d$. Функция $f(B)$ 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 комплексы:

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

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

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

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

Помимо этого, теперь вопрос о типовой мощности трансформатора. Как указывалось, конденсаторы подключаются на первичной стороне, действие этого обе обмотки участвуют в передаче реактивной мощности, причем в неравномерном.

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

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, предоставленным 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 несамоуправляемых 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:

$$B = \frac{\ln 2}{\omega t'_1}.$$

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:

$$P_c = \frac{\omega t'_1}{\ln 2} P_d.$$

2. Пример определения типовой мощности конденсаторов мостового инвертора при активной нагрузке. Расчет ведем при 50 Гц . Если положить время, предоставляемое для низации, равным $5,5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$, что в несколько раз превышает время деинициализации современных вентиляй (такой запас необходим для получения стабильной 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), получаем:

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



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 $25 \div 30\%$ 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 значений регулируемого напряжения. Изложение иллюстрируется численным примером.

Расчет дросселя насыщения при заданной форме и размерах пластины сердечника и при следовательном включении его с активной нагрузкой сводится к определению основных параметров, обеспечивающих нижний и верхний пределы (номинальное значение) регулируемого напряжения.

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

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

Смотрим схему включения (рис. 1) дросселя насыщения. Здесь нагрузка 3 включена последовательно с обмоткой переменного тока 1 ядра насыщения, магнитопровод которого пронизывается потоком обмотки постоянного тока 2. 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 1 при переменном токе 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 дросселя; U_{1n} , U_{3n} и I_{1n} — значения напряжения U_1 , U_3 и тока I_1 при номинальном режиме, при максимальном значении регулируемого напряжения нагрузки; I_{2n} — 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

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

предположим, что U_{3x} мало по сравнению с U_c . Если считать дроссель насыщения так, чтобы при этом ходе на него приходилось напряжение, определяемое из равенства (1) и равное U_{1x} , то небольшое расхождение между расчетом и выполненным 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 несложно найти из равенства (1), напряжение дросселя насыщения $U_{1x} = 0,995U_c$.

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

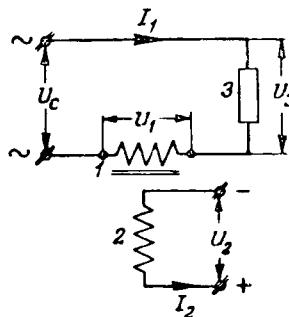


Рис. 1.

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.

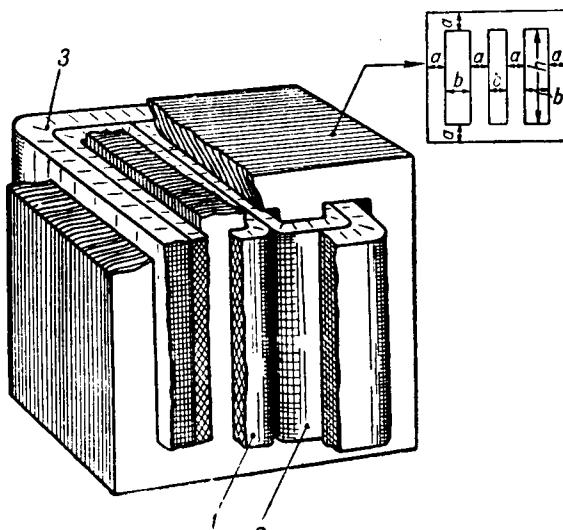


Рис. 2.

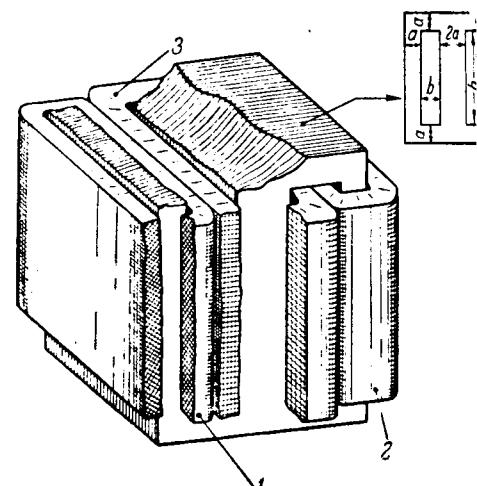


Рис. 4.

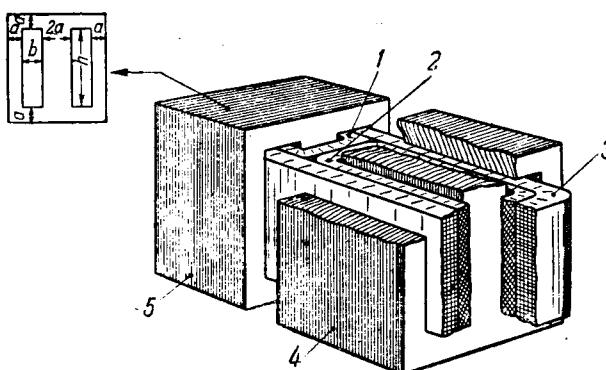


Рис. 3.

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 присоединена 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

$$U_c = 4,44 f B_c Q_a w_1 \cdot 10^{-3}$$

где f — частота, гц;

Q_a — активное сечение, см^2 , той части сердечника магнитопровода, по которой проходит поток обмотки переменного тока.

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

Покажем, из каких соображений можетться величиной w_1 или как ее вычислить.

Прежде всего заметим, что однофазный дельть насыщения при использовании трех- и четырехстержневого сердечника выполняется 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. 4) катушки переменного тока 1 и 2 расположены на двух средних стержнях и охватываются моткой постоянного тока 3. Все четыре стержня имеют одинаковое поперечное сечение. Из 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 максимально плотно. Зная I_{1x} и задавшись пустимой 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.

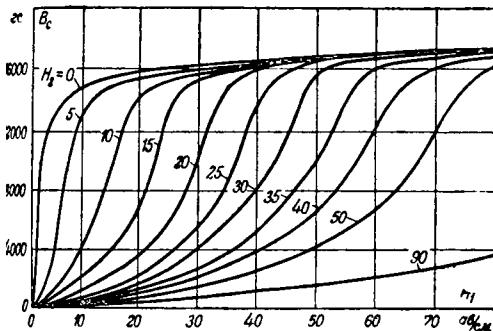


Рис. 5.

При любом варианте использования трехстержневого сердечника в каждом из его окон (рис. 3 и 4) располагается обмотка постоянного тока и одна из обмоток переменного тока. При такой конструкции следует задаться отношением, при котором окно делится между этими обмотками. Площади, приходящиеся на каждую из обмоток, являются при этом известными. Тогда число витков w_1 можно найти, исходя из тех же соображений, что и для четырехстержневого 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 90% площади окна. Эти величины определяют пределы, в которых выбирается отношение площадей, занимаемых обмотками при трехстержневой конструкции сердечника.

Как будет показано ниже, по числу витков, размерам сердечника и размерам части окна, поддающейся на обмотку постоянного тока, можно определить ампервитки и мощность этой обмотки, соответствующие номинальному режиму нагрузки. Если получившееся значение площади окна 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 дросселя до величины U_{3n} , найти мощность, соответствующую этим ампервиткам.

Мощность подмагничивающей обмотки дросселя насыщения, соответствующая номинальному режиму,

$$P_{2n} = I_{2n}^2 R_2. \quad (4)$$

Среднее сопротивление

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

λ_2 — средняя длина витка, м;

q_2 — поперечное сечение обмоточного провода, мм^2 .

Подставив значение R_2 в уравнение (4), получим:

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

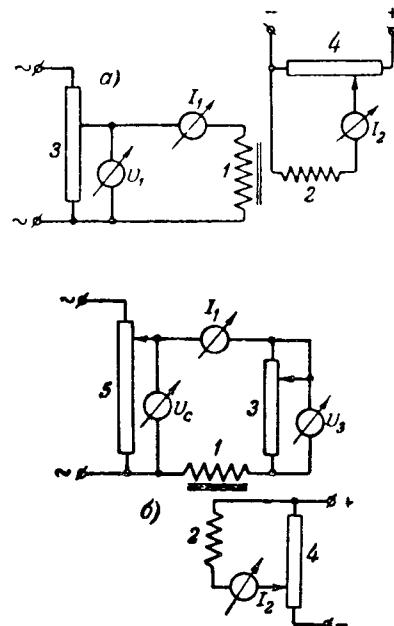


Рис. 6.

здесь $k_3 S_2 = q_2 w_2$, где S_2 — площадь, мм^2 , 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 $I_{2n} w_2$, соответствующие номинальному напряжению нагрузки U_{3n} . 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 I 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

$$H_1 = \frac{I_1 w_1}{I_2} \quad (6)$$

и строить каждую из кривых при постоянном значении ампервитков подмагничивающей обмотки

$$H_2 = \frac{I_2 w_2}{I_1}. \quad (7)$$

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 трехстержневого 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_{3n} , найдем U_{1n} по формуле

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

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

Отложим по оси ординат на рис. 5 максимальное значение индукции B_{1n} 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

$$H_{1n} = \frac{I_{1n}w_1}{l_1}$$

при номинальном режиме нагрузки.

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

$$H_{2n} = \frac{I_{2n}w_2}{l_2}$$

подмагничивающих ампервитков. Умножив найденное значение H_{2n} на длину силовой линии, получим полные ампервитки подмагничивающей обмотки, равные $I_{2n}w_2$. Такой способ работы дает значительные погрешности. Действительно, использование уравнения (8) для определения U_{1n} допустимо в предположении, что U_{3n} согласно, чего в действительности нет. Позади значение B_{1n} , найденное согласно (3), может значительно отличаться от значения индукции в сердечнике дросселя насыщения. Кроме того, используемое нами семейство кривых построено помоши эксперимента, при котором, как это видно из рис. 6, a , напряжение, приложенное к обмотке переменного тока дросселя насыщения, и соответствующая ему индукция B_c синусоидальна. Между тем, в схеме на рис. 1 эта обмотка включается последовательно с активной нагрузкой, что не дает возможности определить погрешности подмагничивающие ампервитки; же если откладывать по оси ординат на рис. 1 существующее в действительности значение индукции вместо B_{1n} . 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 (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 если выбрать четыре независимых параметра, чтобы при значительных изменениях первых и фиксированных значениях второго и третьего четвертый параметр менялся в относительно больших пределах, то можно получить вместе семейства кривых семейств областей, не покрывающих друг друга и ограниченных каждым 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); $\frac{I_{2n}w_2}{I_1w_1} = \frac{I_2H_2}{I_1H_1}$ — 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 оси

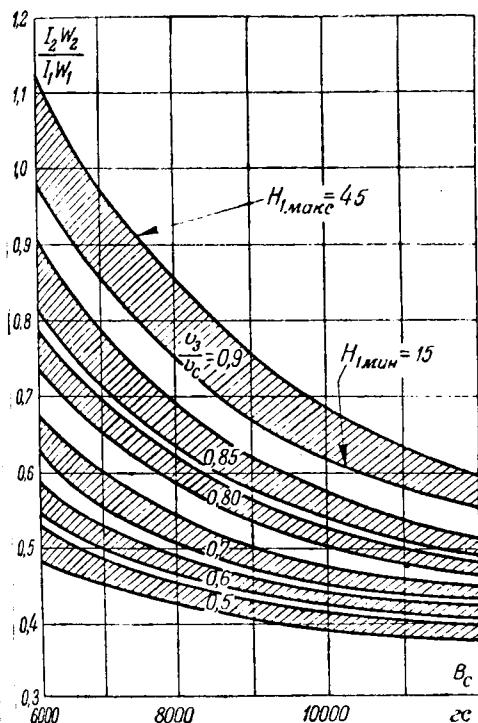


Рис. 7. Кривые построены для: конструкции дросселя насыщения согласно рис. 3, параллельного соединения обмоток переменного тока; частоты 50 гц; трансформаторной стали; пластин магнитопровода с размерами — $a=2$ см, $b=4$ см, $h=14$ см. Заштрихованные области ограничены кривыми

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

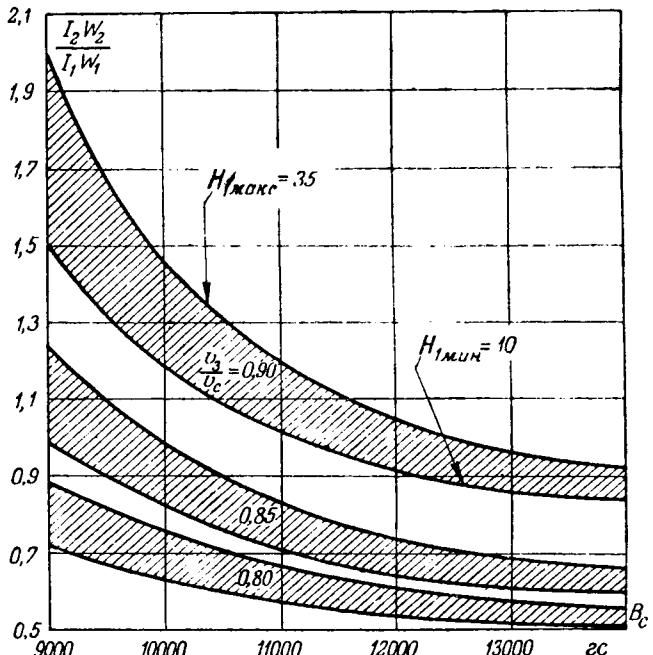


Рис. 8. Кривые построены для: конструкции дросселя насыщения согласно рис. 4; параллельного соединения обмоток переменного тока; частоты 50 гц; трансформаторной стали; пластин магнитопровода с размерами — $a=5$, $b=5$ и $h=20$ см. Заштрихованные области ограничены кривыми

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

нат — отношение $\frac{I_2w_2}{I_1w_1}$. Полагая, что отношение $\frac{U_3}{U_c}$ сохраняет постоянное значение, строят семейство кривых $\frac{I_2w_2}{I_1w_1} = f(B_c)$, где 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 линий параметра H_1 для предельных кривых, имеющих упомянутую область.

Как указывалось выше, при четырехстержневом сердечнике среднее окно заполнено только полкой переменного тока. Если площадь этого умножить на коэффициент заполнения, то чистая площадь поперечного сечения токоведущего материала, который можно в нем уложить. Умножив полученную величину на истинную плотность тока и разделив ее нанюю 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

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 $H_{1\max}$ к $H_{1\min}$, 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. Так же 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 определяется, 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_2w_2 пересчитываются из найденного по показаниям прибора тока I_2 и вычисляется отношение $\frac{I_2w_2}{I_1w_1}$, 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 $H_1 = H_{1\max}$ и для $H_1 = H_{1\min}$. 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 различием расстояния

жением обмоток. Действительно, если вы дроссель насыщения согласно рис. 4, то увеличения ампервитков обмотки постоянного тока все большая часть потока этой обмотки начинает замыкаться через окна сердечника меньшая часть — через крайние стержни, образом, когда магнитная проницаемость становится сравнимой с магнитной проницаемостью воздуха, увеличение подмагничивания сверх некоторой величины незначительно увеличивает насыщение ярма и крайних стержней, увеличивая поток в среднем стержне, т. е. части магнитопровода, где поток обмотки постоянного тока не проходит.

При выполнении дросселя насыщения по схеме на рис. 6, б, средние стержни сдвоенного сердечника являются 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, необходимы для получения номинального режима нагрузки дуту отложить по оси абсцисс значение B_c , определенное из уравнения (3), и из конца отложенного отрезка восстановить перпендикуляр, пересекающий область, соответствующую заданному

отношению $\frac{U_3}{U_c}$. На отрезке перпендикуляра, заключенном между кривыми, ограниченными эту область, следует линейной интерполяцией найти точку для H_{1n} . Ордината этой точки дает искомое значение отношения $\frac{I_{2n}w_2}{I_{1n}w_1}$, которого находятся подмагничивающие ампервитки $I_{2n}w_2$.

Приведем численный пример расчета дросселя насыщения.

Пример. Допустим, что требуется рассчитать дроссель насыщения для регулирования напряжения лампового блока, состоящего из пяти ламп по 1000 вт каждый. Верхний предел регулируемого напряжения определяется номинальным напряжением ламп и составляет $U_{3n} = 12$ в, нижний предел — тем напряжением, при котором накала лампы становится в темноте невидимой. Это напряжение составляет примерно $U_{3x} = 7$ в. Подмагничивающая обмотка питается от полупроводникового выпрямителя и ток ее не должен превышать $I_{2n} = 0,5$ а. При номинальном напряжении лампового блока эта обмотка должна потреблять не более чем $P_{2n} = 40$ вт.

Для компенсации падения напряжения в обмотке переменного тока дросселя насыщения при номинальном режиме нагрузки цепь, состоящая из этой обмотки и лампового блока, питается не непосредственно от сети, через повышательный автотрансформатор с вторичным напряжением U_c . Зададимся величиной отношения $\frac{U_{3n}}{U_c} = 0,85$, тогда $U_c = 141$ в.

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

единенных параллельно. Средняя длина силовой катушки обмотки $I_1 = 100 \text{ см}$. Видно, что ток нагрузки при номинальном режиме

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

поступим, что площадь окна разделена между обмоткой постоянного и переменного тока так, что на первом приходится 70% общей площади окна, а на втором — 30%. Задавшись плотностью тока q_2 , равной $1,5 \text{ а/мм}^2$, то поперечное сечение провода обмотки переменного тока должно быть не менее чем $\frac{41,6}{2 \cdot 1,5} \approx 14,0 \text{ мм}^2$.

Из размеров каркаса, найдем, что в части окна, занятой для этой обмотки, может поместиться $w_1 = 100 \text{ витков}$.

Витки обмотки переменного тока, соответствующие номинальному режиму нагрузки, составят 4160 и $H_{1n} = 41,6$. Ток нагрузки при нижнем регулируемом напряжении определяется из кривой характеристики ламп накаливания и составляет около 26% тока нагрузки при полном режиме. По поставленным условиям напряжение не превышающее 7 в , должно сохраняться и если выйдет из строя или будут отключены витки, т. е. когда номинальная мощность лампового составит только 3000 вт . Отсюда ток нагрузки при пределе регулируемого напряжения составит:

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

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

достигают $H_{1x} = 6,5 \frac{\text{а}}{\text{см}}$.

Несколько пониженная плотность тока принесла того, чтобы учесть дополнительный ток, текущий по контуру, образуемому параллельно соединенными обмотками переменного тока и не поступающий в нагрузки [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 $B_c = 12500 \text{ гс}$. Из уравнения (3) находим активное сечение сердечника $Q_a = 50,8 \text{ см}^2$ и толщину пакета, равную 107 мкм .

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

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

Общая площадь поперечного сечения токопроводящего материала, который можно поместить в части окна, отведенной для сбомтки постоянного тока, будет не более чем $q_2 w_2 = k_3 S_2 = 2500 \text{ мм}^2$. Средняя длина витка этой обмотки $\lambda_2 = 0,6 \text{ м}$. Подставив значения λ_2 и $k_3 S_2$ в уравнение (5), получим, что мощность подмагничивающей обмотки, соответствующая найденным выше ампервиткам $I_2 w_2 = 2900$, составит $P_{2n} \approx 35 \text{ вт}$. 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 $0,5 \text{ а}$. 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. Осовец. Проектирование и расчет дросселей насыщения, Электричество, № 5, 1948.
2. Г. Н. Петров. Трансформаторы, Энергоиздат, т. I, стр. 193, 1934.
3. В. Д. Гусаков. 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 $W_{\text{~}}$ переменного тока они снабжены обмотками W_0 и W_u для подмагничивания постоянным током (рис. 1).

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

заны с выходом выпрямителя посредством управляющего элемента, например гулятора. При течении тока в обмотке W_u напряжение на выходе выпрямителя уменьшается, а ток в обмотке $W_{\text{~}}$ возрастает, что приводит к уменьшению

напряжения на дросселе и, следовательно, к уменьшению выходного напряжения выпрямителя. Для компенсации этого изменения ток в обмотке $W_{\text{~}}$ должен автоматически увеличиваться, что приводит к дальнейшему уменьшению напряжения на дросселе и, следовательно, к уменьшению выходного напряжения выпрямителя.

Если управляющий элемент может обеспечить необходимую кратность изменения тока в обмотке W_u , то для компенсации изменения напряжения на дросселе можно применять обмотку W_u . Тогда ток в обмотке $W_{\text{~}}$ будет пропорциональен напряжению на дросселе, а ток в обмотке W_u — напряжению на выходе выпрямителя.

Методика расчета элементов силовой установки. Определение области намагничивания дросселя переменным током. Для расчета дросселя насыщения заданы диапазон изменения рабочего тока выпрямителя

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

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

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

где H_n — напряженность поля подмагничивания, создаваемая токами обмоток W_0 и W_u .

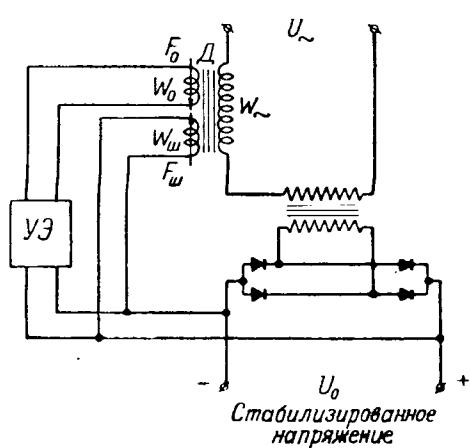
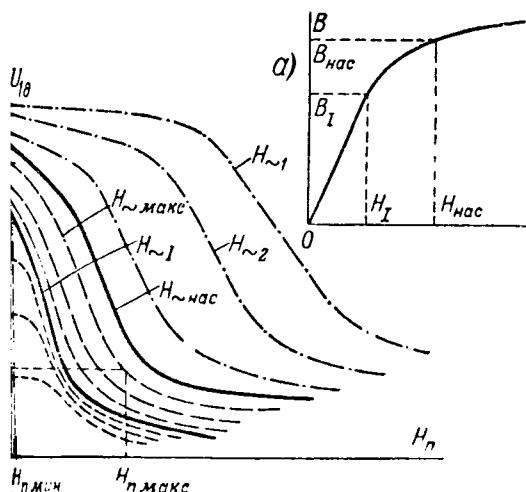


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования при помощи дросселя насыщения.

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



Зависимость напряжения дросселя U_{1d} 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.

Изображено полученное семейство кривых на областях в соответствии с тремя областями намагничивания заданной стали (рис. 2, а): а) 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 пре-
изменением индукции от B_1 до $B_{\text{нас}}$; соот-
вествующая напряженность меняется от H_1 до $H_{\text{нас}}$; в) третья область — сталь насыщена, зна-
чения индукции и напряженности определяются
следующим образом:

$$B > B_{\text{нас}} \text{ и } H_{\sim} > H_{\text{нас}},$$

мотрим, в какой области целесообразна работа дросселя, чтобы получить наибольшее из его напряжения с меньшими затратами токов. При работе в первой области необходимые значения H_{\sim} и H_n , что дает мало меди, но при этом слабо используется и мал диапазон изменения напряжения U_{1d} ; во второй области нужны средние значения H_{\sim} и H_n , затраты меди сравнительно велики, использование стали достаточное и диапазон изменения напряжения большой; работа третьей области требует очень больших значений H_{\sim} и H_n , что ведет к большим затратам токов и диапазон изменения напряжения дросселя является почти такой же, как во второй об-

ъясняется ясно, что в целях уменьшения токов следует работать во второй области, такую область можно захватывать только ограничивающей с ней в случае, если диапазон

изменения рабочих токов дросселя ($I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}$) не укладывается в диапазон изменения H_{\sim} второй области,

$$\frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{мин}}} \approx \frac{I_{\sim \text{ макс}}}{I_{\sim \text{ мин}}} = \delta > \frac{H_{\text{нас}}}{H_1}. \quad (1)$$

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 — $H_{\sim \text{ мин}}$ и $H_{\sim \text{ макс}}$, в которой он должен работать.

Ширина этой области определяется заданным колебанием рабочего тока δ :

$$H_{\sim \text{ макс}} = H_{\sim \text{ мин}} \delta. \quad (2)$$

Область намагничивания постоянным током. Для более эффективного изменения напряжения дросселя его подмагничивание должно происходить в пределах максимального спада U'_{1d} напряжения на кривых (рис. 2):

$$U'_{1d} = f(H_n).$$

Аналитическое условие максимального спада напряжения будет:

$$U'_{1d} = \left(\frac{dU_{1d}}{dH_n} \right)_{\text{макс}}. \quad (3)$$

Поэтому при $I_{\sim \text{ мин}}$ напряженность поля подмагничивания $H_{n, \text{ мин}}$ должна соответствовать началу максимального спада напряжения на кривой с $H_{\sim \text{ мин}}$, а при $I_{\sim \text{ макс}}$ — концу максимального спада напряжения на кривой с $H_{\sim \text{ макс}}$. В результате по кривым на рис. 2 определяем:

$$H_{\sim \text{ мин}} \text{ и } H_{\sim \text{ макс}}.$$

Если управляющий элемент позволяет изменять ток основной обмотки в m раз, то напряженности поля $H_{0\max}$ и $H_{0\min}$ будут связаны следующим уравнением:

$$H_{0\max} = m H_{0\min}, \quad (4)$$

где $H_{0\max}$ и $H_{0\min}$ — напряженности поля, соответствующие максимальному и номинальному току основной обмотки подмагничивания.

Суммарные напряженности поля подмагничивания будут определяться уравнениями:

$$H_{n\max} = H_{0\max} - H_w, \quad (5)$$

$$H_{n\min} = H_{0\min} - H_w, \quad (6)$$

где H_w — напряженность поля от тока дополнительной обмотки.

Из (4), (5) и (6) находим:

$$H_{0\max} = \frac{H_{n\max} - H_{n\min}}{1 - 1/m}, \quad (7)$$

$$H_w = \frac{H_{n\max} - m H_{n\min}}{m - 1}, \quad (8)$$

$$H_{0\min} = \frac{H_{n\max} - H_{n\min}}{m - 1}. \quad (9)$$

Диапазон изменения напряжения дросселя. Найдя значения $H_{n\min}$, $H_{n\max}$, $H_{n\min}$ и $H_{n\max}$ по кривым на рис. 2, определяем диапазон изменения напряжения макета-дросселя от максимального напряжения $U_{1d\max}$ до минимального $U_{1d\min}$.

При $I_{n\min}$ на кривой с $H_{n\min}$ отыскиваем напряжение $U_{1d\max}$, соответствующее минимальному подмагничиванию $H_{n\min}$; при $I_{n\max}$ на кривой с $H_{n\max}$ находим напряжение $U_{1d\min}$, соответствующее максимальному подмагничиванию $H_{n\max}$. Отсюда получаем отношение предельных напряжений:

$$\alpha = \frac{U_{1d\max}}{U_{1d\min}}. \quad (10)$$

Найденная величина α не будет меняться, если, оставляя области намагничивания ($H_{n\min} \div H_{n\max}$, $H_{n\min} \div H_{n\max}$) неизменными, менять размеры и число витков дросселя.

Таким образом, при определении напряжения $U_{0\max}$ и $U_{0\min}$ проектируемого дросселя получаем дополнительное уравнение (10'):

$$\alpha = \frac{U_{0\max}}{U_{0\min}}, \quad (10')$$

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

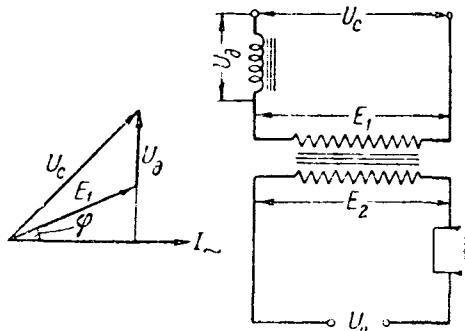


Рис. 3. Приведенная схема трансформатора и дросселя и векторная диаграмма токов и напряжений.

схемы трансформатора и дросселя выпрямленного (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 и ϕ — ток и угол фазы в первичной обмотке трансформатора и угол фазы I 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:

$$(U_o + E_1 \sin \phi)^2 + E_1^2 \cos^2 \phi = U_c^2.$$

Рассмотрим уравнение (11) для двух предельных режимов: 1) напряжение сети имеет максимальное значение $U_{c\max}$, а нагрузка выпрямителя имеет минимальное значение; 2) напряжение сети имеет минимальное значение $U_{c\min}$, а нагрузка имеет максимальное значение.

Эти режимы требуют наибольший предельный изменения напряжения дросселя насыщения. Поэтому его параметры должны определяться этими режимами.

Рассмотрим это более подробно.

При минимальной нагрузке I_{\min} выпрямленное значение ϕ будет максимальным ϕ_{\max} , а величина E_2 должна быть уменьшена с тем, чтобы обеспечить стабилизацию выходного напряжения выпрямителя при уменьшении в нем тока и напряжения. Если при этом еще повышено напряжение сети до $U_{c\max}$, то напряжение должно быть дополнительно уменьшено на $E_{2\min}$. 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 $E_{2\max}$ для компенсации падения напряжения в выпрямителе при повышении нагрузки его до I_{\max} с понижением напряжения сети до $U_{c\min}$.

Для указанных режимов уравнение (11) перепишется следующим образом:

$$\left(\alpha U_{\text{д. мин}} + \frac{E_2 \text{ макс}}{n} \sin \varphi_{\text{макс}} \right)^2 + \frac{E_2^2 \text{ макс}}{n^2} \cos^2 \varphi_{\text{макс}} = U_{c \text{ макс}}^2, \quad (12)$$

$$\left(U_{\text{д. мин}} + \frac{E_2 \text{ макс}}{n} \sin \varphi_{\text{мин}} \right)^2 + \frac{E_2^2 \text{ макс}}{n^2} \cos^2 \varphi_{\text{мин}} = U_{c \text{ мин}}^2, \quad (13)$$

$\frac{E_2}{E_1}$ — коэффициент трансформации; α определяется уравнением (10).

При заданных напряжениях выпрямителя и зоне колебания его нагрузки величины $E_1 \text{ макс}$ и $E_2 \text{ мин}$ определяются расчетом начальной нерегулируемой выпрямительной схемы.

Изменение напряжения сети является заданно-следовательно, уравнения (12) и (13) будут только два неизвестных $U_{\text{д. мин}}$ и n , которые в совместном решении уравнений легко определены.

Результатом мы определили режимы, в которых дроссель должен работать ($H_{\text{макс}}$, $H_{\text{мин}}$, $H_{\text{н.мин}}$) и основные электрические данные дросселя и трансформатора ($U_{\text{д. макс}}$, $U_{\text{д. мин}}$) обеспечивающие стабилизацию напряжения выпрямителя.

Макетный расчет дросселя. Установив макетные данные дросселя, переходим к его макетному расчету, к определению его вибрации и числа витков его обмоток. Предварительно найдем номинальное напряжение $U_{\text{д. ном}}$, которое он будет иметь при максимальной нагрузке $I_{\text{макс}}$ и отсутствии подмагничивания (рис. 2):

$$U_{\text{д. ном}} = U_{\text{д. макс}} \frac{U_{1\text{д. ном}}}{U_{1\text{д. макс}}}, \quad (14)$$

— соответствующее номинальное напряжение дросселя-макета.

Номинального напряжения дросселя напряженное соотношение

$$U_{\text{д. ном}} = 4,44fB_{\text{макс}} S_{\text{д}} 2W_{\text{~}} 10^{-8} \text{~в}, \quad (15)$$

— $S_{\text{д}}$ — индукция и площадь попечения сердечника дросселя, $W_{\text{~}}$ — число витков обмотки переменного тока.

Можно найти по кривой намагничивания — по значению $H_{\text{макс}}$, которое ранее определено. Следовательно, для определения уравнению (15) необходимо знать $W_{\text{~}}$, которая связана только с объемом дросселя и совершенно не влияет

на объем стали. Это легко показать, если уравнение (15) умножить на длину силовой линии $l_{\text{д}}$:

$$l_{\text{д}} = \frac{\sqrt{2} I_{\text{~макс}} W_{\text{~}}}{H_{\text{~макс}}}. \quad (16)$$

Тогда объем стали $Q_{\text{д}}$ будет выражен формулой, в которую не входит $W_{\text{~}}$:

$$Q_{\text{д}} = S_{\text{д}} l_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д. ном}} I_{\text{~макс}} \cdot 10^{-8} \sqrt{2}}{2B_{\text{~макс}} H_{\text{~макс}} 4,44f}. \quad (17)$$

Объем меди $Q_{\text{м}}$ возрастает с увеличением $W_{\text{~}}$ и $S_{\text{д}}$:

$$Q_{\text{м}} \equiv W_{\text{~}} \sqrt{S_{\text{д}}}. \quad (18)$$

После подстановки $S_{\text{д}}$ из (15) в уравнение (18) получим:

$$Q_{\text{м}} \equiv \sqrt{\frac{W_{\text{~}} U_{\text{д. ном}} 10^8}{4,44f B_{\text{~макс}}^2}}. \quad (19)$$

Таким образом, для экономии меди надо брать величину $W_{\text{~}}$ как можно меньше. Но, с другой стороны, при уменьшении $W_{\text{~}}$ сечение катушки уменьшается в $W_{\text{~}}$ раз, а площадь окна дросселя уменьшается пропорционально $l_{\text{д}}^2$ и, следовательно, в W^2 раз [уравнение (16)]; поэтому при очень малом значении $W_{\text{~}}$ нельзя разместить обмотку дросселя.

Следовательно, для возможности уменьшения $W_{\text{~}}$ необходимо, чтобы площадь $S_{\text{д}}$ при заданной длине $l_{\text{д}}$ была бы максимальной (рис. 4). Это будет при равенстве сторон сердечника

$$h = b = \frac{l_{\text{д}}}{4}. \quad (20)$$

Площадь окна может быть выражена в следующем виде:

$$S_{\text{д}} = \frac{l_{\text{д}}^2}{16} \gamma, \quad (21)$$

где

$$\gamma = \left(1 - \frac{4c_1}{l_{\text{д}}} \right)^2. \quad (22)$$

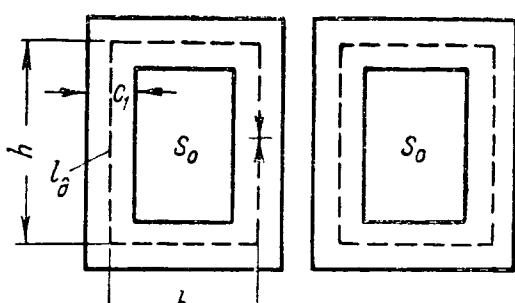


Рис. 4. Сердечник проектируемого дросселя.

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:

$$S_o \geq (W_{\sim} q_{\sim} + W_0 q_0 + W_{\mu} q_{\mu}) \frac{1}{\beta}; \quad (23)$$

здесь q_{\sim} , q_0 , q_{μ} , W_{\sim} , W_0 и W_{μ} — сечение проводников и числа витков соответствующих обмоток дросселя;

β — коэффициент заполнения.

Принимая одинаковую плотность тока для всех обмоток и учитывая равенство (24),

$$\begin{aligned} l_o &= \frac{W_{\sim} \sqrt{2} I_{\text{макс}}}{H_{\sim \text{макс}}} = \frac{W_0 I_{0 \text{макс}}}{H_0 \text{макс}} = \\ &= \frac{W_{\mu} I_{\mu}}{H_{\mu}}, \end{aligned} \quad (24)$$

где $I_{0 \text{макс}}$ и I_{μ} — токи основной и дополнительной обмоток, можно написать уравнение (23) в следующем виде:

$$\begin{aligned} S_o &\geq \frac{W_{\sim} q_{\sim}}{\beta} \left(1 + \frac{H_0 \text{макс} \sqrt{2}}{H_{\sim \text{макс}}} + \frac{H_{\mu} \sqrt{2}}{H_{\sim \text{макс}}} \right) = \\ &= \frac{W_{\sim} k}{\beta}, \end{aligned} \quad (25)$$

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:

$$W_{\sim} \geq \frac{8kH_{\sim \text{макс}}^2}{\gamma \beta l_{\sim \text{макс}}^2}. \quad (27)$$

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:

$$\left. \begin{aligned} F_{\mu} &= l_o H_{\mu}, \\ F_{0 \text{макс}} &= l_o H_{0 \text{макс}} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

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 считать равной:

$$l_o = \sqrt{S_o} \left(1 + \frac{1}{m} \right) 2 \sqrt{m}$$

Объем меди

$$Q_m = W_{\sim} l_o q_{\sim} = W_{\sim} q_{\sim} 2(m+1)c_1.$$

Из уравнения (1a) и (15) находим:

$$m = \frac{U_{\text{д.ном}} \cdot 10^8}{4,44 f B_{\sim \text{макс}} c_1^2 W_{\sim} \cdot 2} = \frac{a_2}{c_1^2 W_{\sim}},$$

где

$$a_2 = \frac{U_{\text{д.ном}} \cdot 10^8}{4,44 f B_{\sim \text{макс}} \cdot 2}.$$

Подставляем в уравнение (3a)

$$Q_m = 2q_{\sim} \frac{W_{\sim} c_1 (a_2 + c_1^2 W_{\sim})}{c_1^2 W_{\sim}} = 2q_{\sim} \left(\frac{a_2}{c_1} + c_1 W_{\sim} \right).$$

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} :

$$W_{\sim} = \frac{16k}{\beta a^3} + \frac{8c_1}{a}.$$

После подстановки W_{\sim} из (9a) в (6a) 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:

$$\frac{dQ_m}{dc_1} = -\frac{2q_{\sim} a_2}{c_1^2} + \frac{32q_{\sim} k}{\beta a^2} + \frac{32q_{\sim} a}{a} = 0.$$

Из уравнения (12a) определяют оптимальное значение c_1 . Зная c_1 , определяем W_{\sim} из (9a) и по (4a) находим l_o , а следовательно, и размеры сечения S_o .

можем, что второе условие (11а) также удовлетворено.

$$\frac{d^2Q_n}{dc_1^2} = \frac{4q_n a_2}{c_1^3} + \frac{32q_n}{a}. \quad (13a)$$

Поскольку q_n , a_2 , a и c_1 имеют положительные зна-
чения, то, следовательно, по (13а)

$$\frac{d^2Q_n}{dc_1^2} > 0.$$

Задание 2. Пример расчета дросселя. Нужно рассчитать дроссель насыщения для стабилизации напряжения селенового выпрямителя на 120 в при различных нагрузках в пределах 1—3 а.

Чтобы определить основные параметры дросселя, для сердечника дросселя трансформаторную выбираем $H_{\text{нап}} = 3,25 \text{ а/см}$. Если $\delta = 3$, то $= 9,75 \text{ а/см}$.

В данной трансформаторной стали начало резкого спада кривой $U_{1\delta} = f(H_n)$ при $H_{\text{нап}} = 3,25 \text{ а/см}$ и когда $H_{\text{нап}} = 0,48 \text{ а/см}$; конец резкого спада кривой при $H_{\text{нап}} = 9,75 \text{ а/см}$ происходит при $H_{\text{нап}} = 5,4 \text{ а/см}$. В соответствии с этим по кривым определяем величину

$$\alpha = \frac{U_{1\delta, \text{ макс}}}{U_{1\delta, \text{ мин}}} = \frac{18}{10} = 1,8.$$

После того, по кривой $H_{\text{нап}} = 9,75 \text{ а/см}$ при $H_n = 0$, что $U_{1\delta, \text{ макс}} = 30 \text{ в}$.

По данным, полученным при расчете обычного стержня (здесь не приводится), $E_{2\text{ макс}} = 121 \text{ в}$, $\gamma = 0,33$, $\cos \varphi_{\text{мин}} = 0,945$, $E_{2\text{ мин}} = 108 \text{ в}$, $\sin \varphi_{\text{ макс}} = \sin \varphi_{\text{мин}} = 0,9$. Указанные величины для расчета являются заданными. Линейное напряжение $U_{\text{нап}}$ равно 120 в.

Подставив эти значения в уравнения (12) и (13), $U_{\text{нап}} = 11,68 \text{ в}$; $n = 1,87$; $U_{1\delta, \text{ макс}} = 21 \text{ в}$. Если напряжение изменяется в пределах от $U_{\text{нап}}$ до $U_{\text{нап}}$, ставив их значения в (12) и (13), аналогично определим $U_{1\delta, \text{ мин}}$ и n .

Далее определим H_0 и $H_{\text{ш}}$. Предположим, что управляющий элемент (например, угольный регулятор) обеспечивает изменение тока в основной обмотке в шесть раз. ($m = 6$). Тогда, пользуясь (7), (8) и (9), находим $H_0, \text{ макс} = 6,0 \text{ а/см}$; $H_{\text{ш}} = 0,5 \text{ а/см}$ и $H_0, \text{ мин} = 1,0 \text{ а/см}$.

После этого вычислим величину $I_{\text{нап}}$ при условии, что выпрямитель выполнен по трехфазной мостовой схеме, а обмотки трансформатора соединены по схеме звездо-треугольник:

$$I_{\text{нап}} = 3 \cdot 0,47 \cdot 1,87 = 2,65 \text{ а}.$$

Конструктивный расчет дросселя. Вначале определим величину k согласно (25). Задавшись нормальной плотностью тока в обмотках равной 200 а/см^2 , 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:

$$W_{\text{нап}} \geq \frac{8 \cdot 0,025 \cdot 9,75^2}{0,3 \cdot 0,18 \cdot 2,65^2} = 53 \text{ витка.}$$

Пользуясь (15), подсчитаем величину S_{δ} . Предварительно с помощью (14) найдем значение $U_{1\delta, \text{ макс}}$:

$$U_{1\delta, \text{ макс}} = \frac{21 \cdot 30}{18} = 35 \text{ в}.$$

Тогда

$$S_{\delta} = \frac{U_{1\delta, \text{ макс}}^{108}}{2 \cdot 4,44 f B_{\text{нап}} W_{\text{нап}}} = \frac{35 \cdot 10^8}{2 \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 13000 \cdot 53} = 11 \text{ см}^2.$$

Здесь $B_{\text{нап}} = 13000 \text{ Гц}$ определено по кривой намагничивания трансформаторной стали при $H_{\text{нап}} = 9,75 \text{ а/см}$.

Далее по (16) и (20) находим, что $l_{\delta} = 22 \text{ см}$ и $h = b = 5,5 \text{ см}$.

Наконец, с помощью (28) вычисляем и. с. дополнительной и основной обмоток дросселя: $F_{\text{ш}} = 11$ ампервитков и $F_{0, \text{ макс}} = 182$ ампервитков.

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 теплозависимые, изготовленные из полупроводников, полупроводники состоятся почти все

металлов и ряд их сульфидов. В табл. 1 приведены основные характеристики ряда полупроводников, служащих для изготовления сопротивления.

Сопротивления выпускаются различных размеров и исполнений. Некоторые термосопротивления монтируются в стеклянном баллоне и вакуумные и газонаполненные. 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 α , $\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$	Температурный коэффициент α_T при -20°C , %
Ag_2S	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$-(3,8 \div 5)$
$\text{CuO} + \text{Mn}_3\text{O}_4$	$10^{-1} \div 10^{-2}$	$-(3 \div 3,2)$
UO_2	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$-3,2$
CuO	$10^{-2} \div 10^{-6}$	$-2,6$
$\text{Mn}_2\text{O}_4 + \text{NiO}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$-3,2$
$\text{TiO}_2 + \text{MgO}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$-1,3$
ZnO	1,0	$-0,8$
$\text{CuO} + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$-2,8$

С достаточной точностью можно принять, что в диапазоне до $300 \div 350^{\circ}\text{C}$ 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:

$$T = \frac{B}{2} \pm \sqrt{\frac{B^2}{4} - BT_0}. \quad (7)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

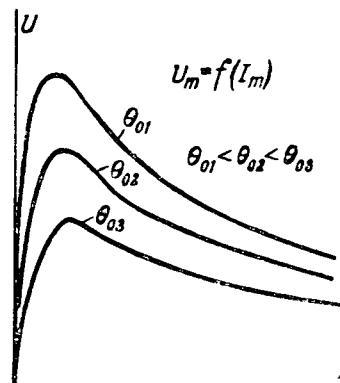


Рис. 1

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 при изменении 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 T_0 — температура в $^{\circ}\text{C}$. Отмечено, что при вышении T_0 ординаты характеристик уменьшаются. Наибольшее изменение испытывает сама точка перегиба характеристики. Кривые можно получить расчетным путем по формулам (4), (5) и экспериментально.

При изменении коэффициента теплоотдачи происходит деформация характеристики. С ростом α ординаты характеристик (рис. 2). Это свойство вольтамперной характеристики позволяет получить релейный эффект в некоторых цепях с термосопротивлениями, содержащих линейное сопротивление.

Под релейным эффектом мы понимаем резкое увеличение или уменьшение тока в цепи, сопровождающееся изменением параметров элементов данной цепи.

Релейный эффект может быть вызван изменением: 1) напряжения, приложенного к замкнутому участку цепи; 2) температуры окружающей среды; 3) коэффициента теплоотдачи термосопротивления.

Рассмотрим первый случай. Предположим, что термосопротивление соединено последовательно с линейным сопротивлением. Поведение цепи при изменении питающего напряжения можно изучить графически. На рис. 3, а нанесена вольтамперная характеристика. Для такой цепи справедливо соотношение

$$U_m = U - Ir.$$

Таким образом, ток цепи определяется выражением характеристики

$$U_m = f_1(I_m) \quad \text{и} \quad f_2(I) = U - Ir.$$

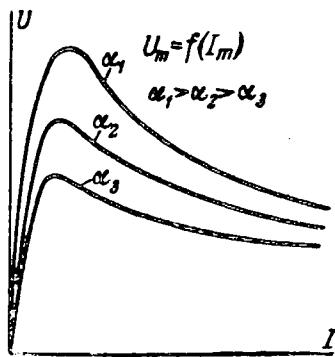


Рис. 2

если 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 случаях будет сравнительно небольшое увеличение тока. По достижении напряжения величины U_2 мы получим касание характеристик в точке 2 и пересечение в точке 3. Как видно, точка 2 характеризует неустойчивое состояние цепи, так как при малейшем увеличении напряжения появится лавинообразное нарастание тока, и цепь перейдет в состояние, характеризуемое точкой 3. Цепь 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,ляемой в термосопротивлении и отдаваемой окружающей среде. Обратный скачок тока происходит при уменьшении напряжения, подводимого к схеме, до значения U_3 , но в этом случае U_3 будет всегда меньше U_2 . Подробный аналогичный анализ явления будет дан ниже.

Другой случай релейного эффекта может бытьчен при изменении температуры окружающей среды.

Помимо цепи из термосопротивления и либо сопротивления (рис. 3, б). Как и в предыдущем случае, ток цепи определяется пересечением характеристик $U_m = f_1(I_m)$ 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 будем повышать температуру среды. По достижении температуры Θ_{02} получим касание характеристик в точке 2 и пересечение в точке 3. Так как точка 2 характеризует неустойчивое состояние цепи, то ток со значения I_2 скачком возрастает до значения I_3 . Таким образом, получается 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} , том $\Theta_{03} < \Theta_{01}$.

При понижении температуры окружающей среды ординаты характеристики расрутся так, что

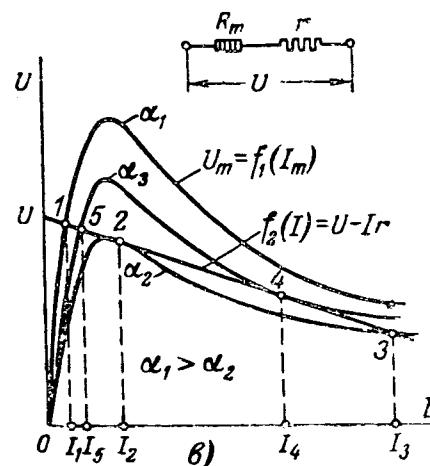
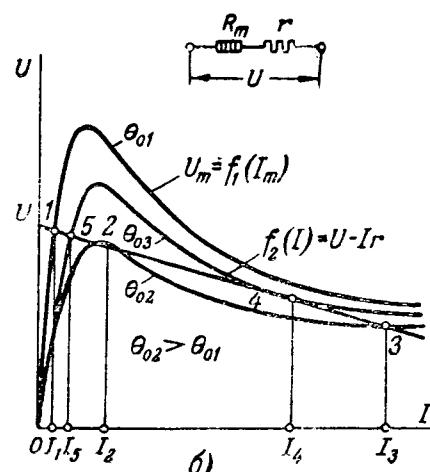
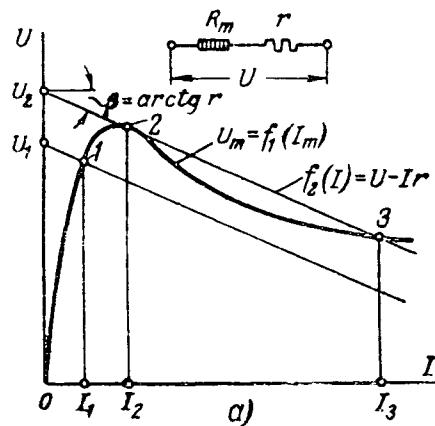


Рис. 3

при некоторой температуре Θ_{03} мы получим касание характеристик $U_m = f_1(I_m)$ и $f_3(I) = U - Ir$ 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

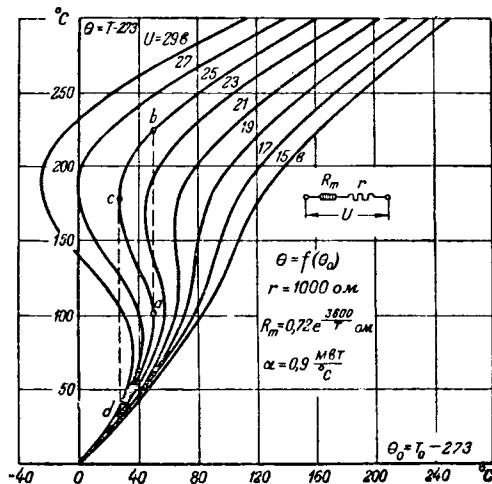


Рис. 4

состава среды, в которой находится термосопротивление. Подобно предыдущему случаю характеристики термосопротивления деформируются с изменением коэффициента теплоотдачи (рис. 2).

Допустим, что цепь из термосопротивления и линейного сопротивления включена на напряжение U (рис. 3, б). В первый момент коэффициент теплоотдачи составляет α_1 . Ток цепи определяется точкой 1, т. е. пересечением характеристик $U_m = f_1(I_m)$ и $f_2(I) = U - Ir$. При уменьшении коэффициента теплоотдачи до значения α_2 получим постепенное увеличение тока цепи до значения I_2 , а затем ток скачком возрастает до величины I_3 (релейный эффект). Обратный скачок тока получим при возрастании α до значения α_3 . В этом случае характеристики касаются в точке 4, и ток со значения I_4 скачком уменьшается до I_5 .

Проанализируем качественную сторону процесса. Как указывалось выше, для цепи с термосопротивлением и линейным сопротивлением справедливо

$$U = U_m + Ir.$$

На основании уравнений (2), (4), (5) получим:

$$U = \sqrt{a(T - T_0)R_m e^{\frac{B}{T}}} + \\ + r \sqrt{\frac{a}{R_m} (T - T_0) e^{-\frac{B}{T}}} \quad (9)$$

Необходимо определить условия возникновения и прохождения релейного эффекта. Так как в этот момент сопротивление термосопротивления, а следовательно, и его температура резко меняются, то уравнение (9) позволяет проследить зависимость T от U , α и T_0 .

К сожалению, это трансцендентное уравнение не удается решить относительно T_0 , но оно весьма просто решается относительно T_0 и α . Для

примера решаем его относительно T_0 и производим графическое обращение функции

$$T_0 = T - \frac{U^2}{\alpha \left(R_\infty e^{\frac{B}{T}} + 2r + \frac{r^2}{R_\infty} e^{-\frac{B}{T}} \right)}.$$

На основании этого уравнения строим для каждого случая семейство кривых обращенных функций $T = f(T_0)$ (рис. 4) при различных значениях приложенного напряжения.

В нашем случае был взято термосопротивление со следующими параметрами: сопротивление $R_m = 158 \times 10^3$ ом при 20°C ; коэффициент теплоотдачи $\alpha = 0,9 \text{ мвт/}^\circ\text{C}$; теплоемкость $C = 1,0 \text{ мвт}\cdot\text{сек/}^\circ\text{C}$. Сопротивление определяется уравнением

$$R = 0,72 e^{\frac{3600}{T}}.$$

Величина линейного сопротивления $r = 1000 \text{ ом}$.

Возьмем одну из кривых и проанализируем физический процесс, выражаемый ею (рис. 4). Предположим при некоторой температуре окружающей среды Θ_0 температура термосопротивления Θ_1 . Будем повышать температуру окружающей среды. Соответственно этому будет расти температура термосопротивления. Допустим, при температуре Θ_0 состояние термосопротивления определяется точкой a . Но точка a характеризует неустойчивое состояние цепи. При незначительном росте температуры среды на $\Delta\Theta$ получим нарушение энергетического баланса термосопротивления, сопровождающееся ростом его температуры до значения Θ'_1 . Таким образом, в диапазоне температур $\Theta_0 - \Theta'_1$ существует разность энергии, отдаваемой в окружающую среду и выделяющейся в термосопротивлении, что ведет к быстрому росту его температуры или

$$\Delta P = \frac{U^2 R_m e^{\frac{B}{T}}}{\left(R_\infty e^{\frac{B}{T}} + r \right)^2} - \alpha (T - T_0) > 0. \quad (10)$$

Это явление вызывает падение сопротивления термосопротивления, а следовательно, и нарастание тока в цепи — получаем релейный эффект.

На рис. 5 показана зависимость ΔP от температуры в момент релейного эффекта, соответствующая кривым на рис. 4. Этот процесс продолжается до того момента, когда ΔP становится равным нулю.

Теперь станем понижать температуру окружающей среды. В некотором пределе до точки c мы получим плавное понижение температуры определяемое участком bc кривой. Но точка c также характеризует неустойчивый режим. При малейшем понижении Θ_0 температура

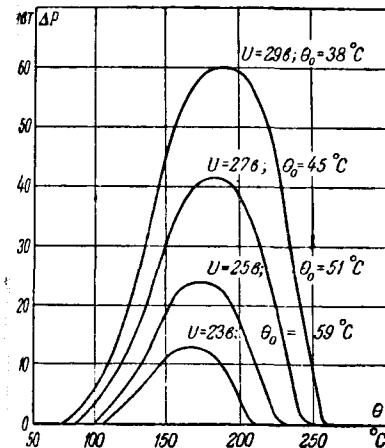


Рис. 5

падает, и этот процесс кончается тогда, когда состояние термосопротивления определено точкой d . В этом случае имеем обратный ток. Энергетически такой переход определяется тем, что энергия, отдаваемая в окружающую среду, больше энергии, выделяемой в термосопротивлении, т. е.

$$\Delta P = \frac{\frac{B}{R_\infty e^{\frac{B}{T}}}}{\left(\frac{B}{R_\infty e^{\frac{B}{T}}} + r\right)^2} - \alpha(T - T_0) < 0. \quad (12)$$

На основании (5) и кривых рис. 4 можно строить кривые тока цепи и функции температуры окружающей среды при постоянном токе на схеме и в функции напряжения при постоянной температуре среды.

При рассмотрении кривых на рис. 4 видим, что релейный эффект проявляется 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 изображения их можно заключить, что токи прямого и обратного скачка различны, т. е. эти токов соответствуют кривым температур и 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 прямого скачка температура обратного скачка падает.

Коэффициент сопротивления r также влияет на температуру данной схемы и на величину скачка тока.

Описанное свойство цепи с термосопротивлением может быть положено в основу создания реагирующих на определенную уставку температуры, как, например, температурной сигнализации, тепловой защиты, регулирования температуры.

Примером этому является схема тепловой защиты электродвигателя, разработанная и вы-

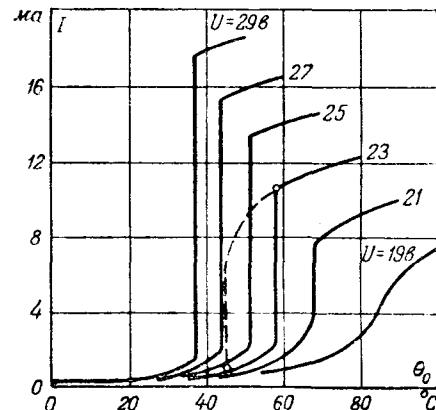


Рис. 6.

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 w_2 , сидящей на магнитопроводе контактора. Таким образом, контактор выполняет функцию трансформатора. Напряжение от обмотки w_2 выпрямляется селеновым выпрямителем B_2 , который питает цепь термосопротивления и обмотки управления магнитного усилителя.

В изготовленном образце обмотка w_2 имеет 5 выводов, что позволяет изменять напряжение, подаваемое в цепь термосопротивления и тем самым менять уставку температуры срабатывания схемы.

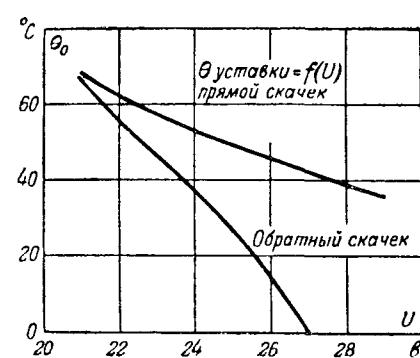


Рис. 7

Схема работает следующим образом.

При нажатии кнопки P срабатывает контактор пускателя и двигатель включается в работу. Так как температура его ниже предельной, то

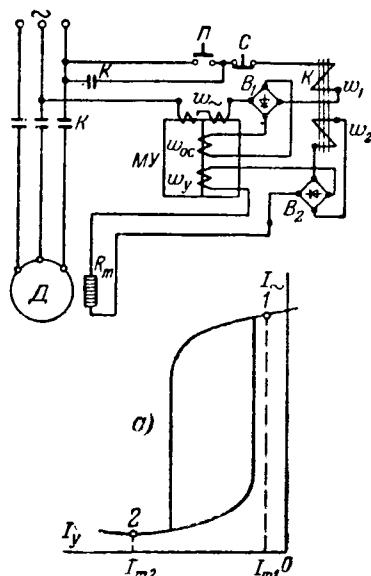


Рис. 8

ток в цепи I_{m_1} мал и не влияет на работу схемы. Этот режим характеризуется точкой 1 на характеристике магнитного усилителя (рис. 8). При достижении температурой двигателя температуры уставки ток в цепи термосопротивления и w_y резко возрастает до значения I_{m_1} (релейный эффект). В этом случае режим цепи магнитного усилителя и w_1 будут определяться точкой 2. Вследствие уменьшения тока катушки пускатель отключает двигатель.

Последующий пуск электродвигателяжен при понижении его температуры нижеустановки.

Практический расчет такой схемы выполнить, имея семейство вольтамперных теристик термосопротивления для раз температур окружающей среды.

Данная схема была выполнена смагнитным пускателем П-322 и испытана в лаборатории Института электротехники Академии наук Результаты испытания представлены в табл.

Таблица

Номера выводов обмотки, w ,	Temperatura срабатывания схемы (°C) при напряжении сети, U		
	$U = 210$	$U = 220$	$U = 240$
1	77	74	68
2	80	77	71
3	85	81	75
4	90	86	80
5	95	90	84

Литература

- Б. Т. Коломиец. Термисторы, Электричество, 1947.
- Б. С. Сотсков. Термисторы и применение схемах А и Т, № 1, 1948.
- Б. Т. Коломиец и И. Т. Шефтель. Измерение температур полупроводниковыми термометрами противления, ЖТФ, октябрь 1947.
- J. A. Becker, C. Green, G. L. Pears. Properties and Uses of Thermistors—Thermally Sensitive El. Eng. November, 1946.



Об одном элементарном соотношении в некоторых симметричных потенциальных полях

Кандидат техн. наук А. В. НЕТУШИЛ

Московский энергетический институт им. Молотова

Одной из важнейших практических задач, связанных с расчетом потенциальных полей, является определение отношения разности потенциалов между двумя экви-потенциальными поверхностями к потоку, ограниченному некоторой поверхностью.

В электрическом поле это отношение определяет емкость или сопротивление, в магнитном — магнитное сопротивление, а в тепловом и гидродинамическом полях оно характеризует тепло-

водное и гидродинамическое сопротивление. На основании соображений симметрии выводится выражение, позволяющее определить сопротивление или емкость участков потенциальных плоскопараллельных полей, обладающих симметрией потенциальной функции и функции потока на границе. Приводится ряд примеров расчета сопротивлений без определения картины поля. Рассмотренные примеры в равной степени применимы для электрических, магнитных, тепловых, гидродинамических и других потенциальных полей.

В плоскопараллельных полях это отноше-

ние выражается как частное деления разности потенциалов на разности потоков.

Если участок параллельного потенциального поля ограничен двумя силовыми линиями с функциями потоков ψ_1 и ψ_2 и линиями равного потенциала с потоками φ_1 и φ_2 , то сопротивление проводника, заполняющего рассматриваемый участок

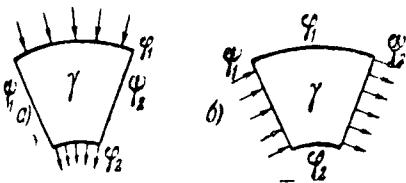


Рис. 1

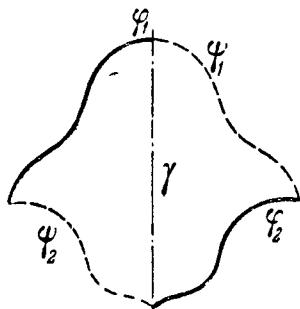


Рис. 2

Подключении тока к поверхностям ϕ_1 и ϕ_2 (1, а) выражается так:

$$R = \frac{1}{\gamma l} \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1 - \phi_2}, \quad (1)$$

l — толщина проводника, а γ — его удельная проводимость.

Заменив в выражении (1) местами функции ϕ , получим выражение сопротивления при подключении тока к поверхностям ϕ_1 и ϕ_2 и совпадении силовых линий с поверхностями ϕ_1 (рис. 1, б)

$$R' = \frac{1}{\gamma l} \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1 - \phi_2}. \quad (2)$$

Если граничные условия таковы, что из соображений симметрии можно установить равенство

$$R = R', \quad (3)$$

то $\phi_1 = \phi_2$ и, следовательно,

$$R = \frac{1}{\gamma l}. \quad (4)$$

Равенство выполняется во всех случаях, если может быть указана такая ось симметрии, что граничная линия $\phi = \text{const}$ справа от оси симметрии является зеркальным изображением линии $\phi = \text{const}$ слева от оси симметрии, и наоборот (рис. 2).

Однако, пользуясь приведенными соображениями, можно легко определить величину сопротивления и емкости между электродами для некоторых частных, но практически важных, случаев.

Пример 1. Ромбическая прямая призма. Основанием прямой призмы является ромб (3, а), то обе пары противоположных граней равны в отношении подведения к ним тока и, следовательно, вне зависимости от величины

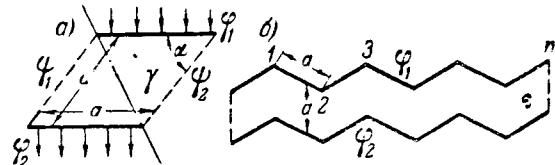


Рис. 3

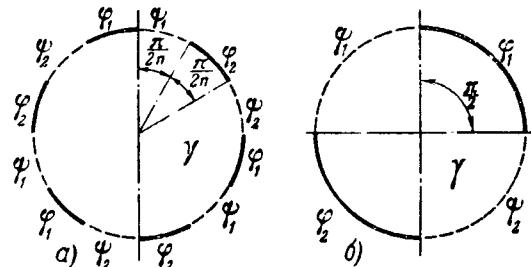


Рис. 4

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

$$C = \epsilon_0 n l,$$

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 эквидистантных линий по окружности цилиндра совпадают. Так как для этого случая замена ϕ на ψ и наоборот не приводит к изменению задачи, то

$$\phi_1 - \phi_2 = \psi_1 - \psi_2$$

и, следовательно,

$$R = \frac{1}{n \gamma l}$$

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 научно-технического сопротивления между

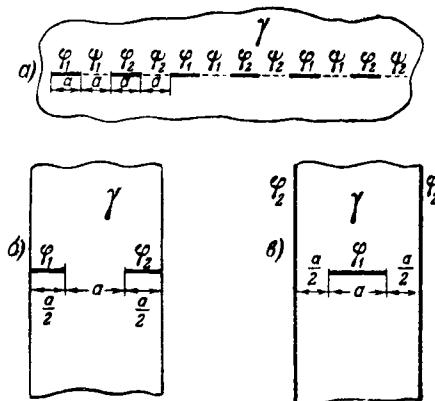


Рис. 5

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 расставляются 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

$$R = \frac{1}{2\gamma l},$$

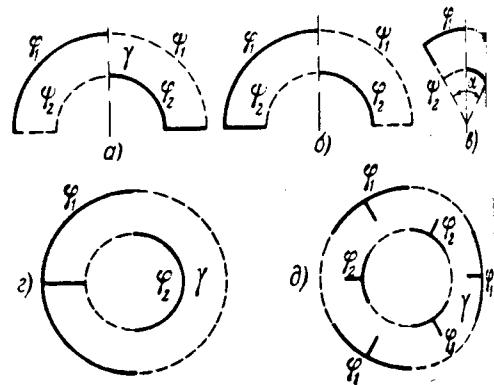


Рис. 6

а для рис. 6, д

$$R = \frac{1}{6\gamma l}.$$

Два последних выражения так же, как и мер 2, могут представить интерес при измерении удельных параметров полупроводящих цирров.

Пример 5. Система угольников. Прямоугольная призма с электродом в виде угольников, изображенных на рис. 7, также удовлетворяет условию (3). Отсюда логично предыдущим примерам легко показать что сопротивление между электродами в конструкциях, 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 Для рис. 7, в $n = 4$.

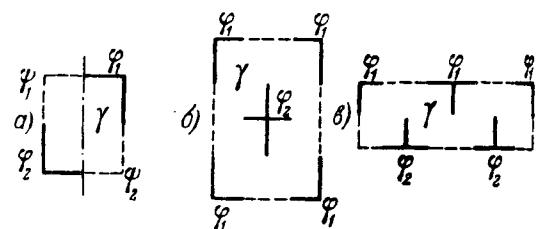


Рис. 7

Пример 6. Система: пластина—угольник. Границные условия в случае, изображенном 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.

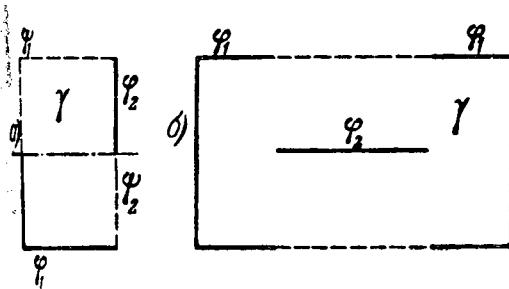


Рис. 8.

В этом случае сопротивление между электродами

$$R = \frac{1}{4\gamma l}.$$

Пример 7. Сопротивление между двумя концентрическими многоугольниками. Пусть концентрических многоугольника расположены так, что напротив вершин углов внешнего многоугольника располагаются центры сторон внутреннего многоугольника, а расстояние между этими точками равно половине стороны внешнего многоугольника (рис. 9, a). В таком случае поверхность, 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 еще (3) и, следовательно, его сопротивление может быть выражено по формуле (4). Общее сопротивление пустотелого многогранника, выполненного на двух таких многоугольниках, представляет собой параллельное соединение сопротивлений $2n$ отдельных элементов и равно

$$R = \frac{1}{2n\gamma l},$$

— число углов многоугольников.
если $n=4$ (рис. 9, б), то

$$R = \frac{1}{8\gamma l}.$$

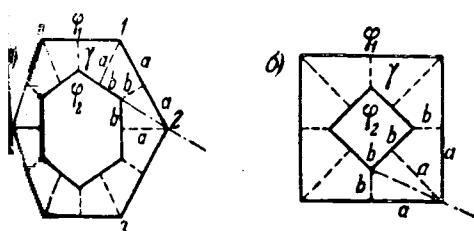


Рис. 9.

Пример 8. Внешнее сопротивление квадрата. Четырьмя сопротивление между двумя электродами, совпадающими с противоположными сторонами квадратного сечения, выполненного из диэлектрика и погруженного в полупроводник с удельной проводимостью γ (рис. 10). Внешнего пространства, граничащего со стержнем (при исключении краевого эффекта на стержне), соблюдается такая же симметрия

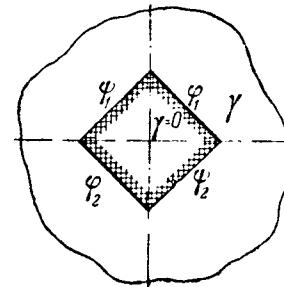


Рис. 10.

рия, как и при выводе формулы (4) и, следовательно, сопротивление между электродами может быть рассчитано по этой формуле.

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 ψ и ϕ 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:

$$Z = x_1 \operatorname{sn} \left(\frac{2Kw}{U} \right); \quad (\Pi,1)$$

здесь $w = \varphi + j\phi$ — комплексный потенциал точки; Z — ее комплексная координата; K — полный эллиптический интеграл первого рода $K = K(k)$; $k = \frac{x_1}{x_2}$ — модуль эллип-

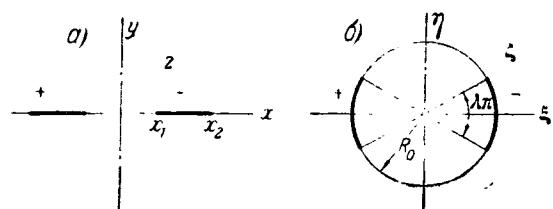


Рис. 11

тического синуса; U — разность потенциалов между пластинами.

В таком случае сопротивление между пластинами может быть выражено так:

$$R = \frac{1}{\gamma l} \frac{K(k)}{K(\sqrt{1-k^2})}. \quad (\Pi,2)$$

Если теперь произвести дробнолинейное конформное преобразование вида

$$\zeta = A \frac{Z+B}{Z+C} \quad (\Pi,3)$$

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)

$$R = \frac{1}{\gamma t} \frac{2K(k)}{K(V\sqrt{1-k^2})}. \quad (\text{П.4})$$

Если дуга окружности, охватываемая одним электро-
дом, равна $\lambda\pi$, то, определив постоянные преобразования
 A , B и C в (П.3) из условий

$$\zeta(0) = -jR_0, \quad \zeta(x_1, 0) = R_0 e^{-j\lambda\pi},$$

$$\zeta(x_2, 0) = R_0 e^{j\lambda\pi} \quad \text{и} \quad \zeta(\infty) = jR_0,$$

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,

$$R = \frac{1}{\gamma t} \frac{2K(0,171)}{K(0,9707)} = \frac{1}{\gamma t} \frac{2 \cdot 1,5825}{3,165} = \frac{1}{\gamma t},$$

т. е. результаты, полученные при расчете по формуле (П.4), в точности совпадают.

Литература

1. А. Н. Беликов. Электросушка массивной сины, Лесная промышленность, № 7—8, 1941.
2. А. В. Нетушил. Электрические поля в тропических средах, Электричество, № 3, 1950.
3. А. В. Нетушил, К. Б. Исаев и С. К. Фролов. Применение системы формул Максвелла для сопротивлений между электродами при электропропаганде бетона, Электричество, № 6, 1949.
4. Инструкция по применению электропропаганды строительства, Наркомстрой, 1945.
5. Л. И. Балабуха. Математический расчет полей электростатики, Теоретическая и экспериментальная электротехника, № 1—2, 1932.



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 осцилограмм 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 интенсивность послесвечения люминофора не успеет 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 тече-

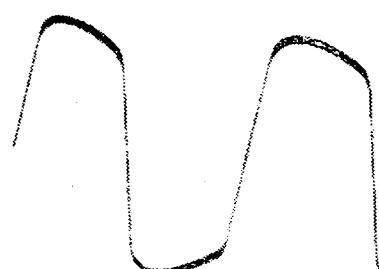
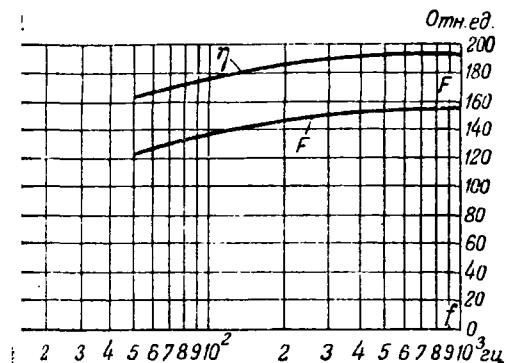


Рис. 1. Характерный вид осцилограмм напряжения сети, напряжения на лампе и тока, проходящего через лампу при частотах 400—1 000 гц. (балласт-омическое сопротивление)



Зависимость светового потока люминесцентных ламп от частоты переменного тока.

кого периода. В этом можно убедиться, сравнивая формы кривых тока и напряжения в случаях [Л. 1].

На таблице и на рис. 2 приведены данные одних измеренных ламп при разных частотах питающего напряжения.

Частота питающего тока, Гц	Напряжение на лампе, в	Ток через лампу, а	Потребляемая мощность, вт	Световой поток F в относительных единицах	Световая отдача τ 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
1 000	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

ушки взаимной индуктивности на 0,01 гн, часто применяются в электрических и

излагается простой метод измерения взаимной индуктивности по известным активному сопротивлению и частоте сети.

ных 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 в практике [Л. 1].

Ображенной на рис. 1 схеме э. д. с. взаимной индуктивности, сравнивается с падением напряжения на известном активном сопротивлении, включенном последовательно с объектом измерения. Если стрелка индикатора, имеющего много большое сопротивление, отклоняется на те же углы в обоих положениях переключателя, справедливо очевидное соотношение

$$I\omega M_x = IR_0,$$

$$M_x = \frac{R_0}{\omega}; \quad (1)$$

меряемая взаимная индуктивность, гн; разовое активное сопротивление, ом; измеряемая частота колебаний сети, сек.

Для плавности изменения R_0 и уменьшения погрешности, связанной с непостоянством переходных сопротивлений контактов переключателей, R_0 составляется из постоянного сопротивления (бифильярная 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 степени подвержен влиянию гармоник напряжения сети нежели приборы, показания которых пропорциональны амплитудному или среднему значению напряжения.

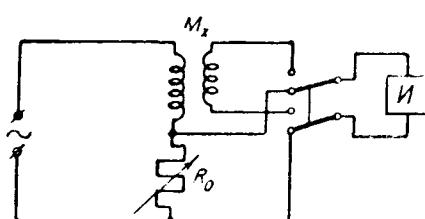


Рис. 1.

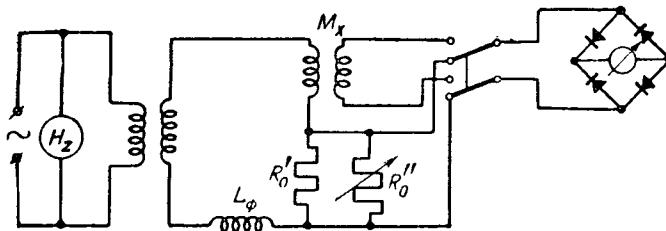


Рис. 2.

При применении квадратичного индикатора погрешность измерения, вызванная гармониками, составляет

$$\Delta_2 = + \left[\sqrt{\frac{1 + 4\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 + 9\left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 + \dots}{1 + \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 + \dots}} - 1 \right] 100\%, \quad (2)$$

здесь: Δ_2 — погрешность измерения, обусловленная гармониками в процентах; I_1 — амплитуда тока основной частоты, проходящего через катушку, a ; I_2, I_3 — амплитуды токов соответствующих гармоник, a .

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 $\Delta_2 \approx +0,5\%$. Так как величина Δ_2 лежит в пределах $0 \div +0,5\%$, можно ввести поправочный коэффициент $K = 1,0025$, на который умножается частота сети. Тогда погрешность сводится к величине $\delta_2 = \pm 0,25\%$.

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 (отклонение

ординат от чистой синусоиды не превышает 5% амплитуды) можно считать, что δ_2 составляет примерно $\pm 0,1\%$. При наличии существенных искажений следует, сняв осциллограмму, вычислить содержание отдельных гармоник напряжения [Л. 3]. Затем, в соответствии с сказанным, определяются гармоники тока, проходящего 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 φ (чувствительность: $1^\circ = 0,2 \text{ мка}$) и сказанных отечественной промышленностью высокочастотных медно-закисных выпрямителей, склонение стрелки прибора на 25 делений имеет место при напряжении 0,3 в. Харakterистика прибора 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. Прибор требуемого напряжения осуществляется комбинацией чисел витков трансформатора.

Для измерения частоты колебаний сети можно применять стрелочный частотомер.

Для уменьшения погрешности, связанный с колебаниями напряжения сети, следует из среднее арифметическое из результатов измерений с уравновешиванием схемы.

При использовании стрелочного частотометра класса 0,2, фильтровой катушки и осциллографа аналитическое 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 прибора в пределах 0,2%.

Литература

1. J. Dowling. Нешунтирующий ламповый частотометр. Philosophical Magazine, т. 25, № 166, 1938.
2. В. Базилевич. Электрические измерения и приборы. КУБУЧ, стр. 378, 1935.
3. К. А. Круг. Основы электротехники. Госиздат, т. 2, стр. 242, 1946.



Простой способ численного решения алгебраических уравнений

Доктор техн. наук, проф. Д. А. ГОРОДСКИЙ
Москва

При анализе систем
уравнения бывает
известно, хотя бы
близко, но, по воз-

можности, быстро оценить значения корней
алгебраического уравнения. Указываемые
приемы дают возможность сравнительно
быстро решить эту задачу.

1. Приближенное решение. Дано уравнение:

$$p^k + a_1 p^{k-1} + a_2 p^{k-2} + \dots + a_n = 0. \quad (1)$$

Помагая:

$$+ a_1 p^{k-1} + \dots + a_k p^{k-k} + \dots + a_n = f(p), \quad (2)$$

нашаем все точки плоскости комплексного переменного p на плоскость $f(p)$. Те из них, которые лежат на окружности $|p| = \text{const}$, фиксируя которых, мы получим уравнение (2). Для этих точек числовые членов выражения (2) постоянны и при движении от точки к точке меняются лишь их знаки ($n-k$ ($0 \div 30 \div 60$ и т. д.) градусов). Построив на плоскости $f(p)$, пользуясь окружностью с углами $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Получается некоторый многоугольный механизм, отдельные звенья которого вращаются со все большей и большей угловой скоростью.

Таким образом, любая выбранная на плоскости $f(p)$ (рис. 1) превращается на плоскости p некоторую кривую (рис. 2).

Задав p , легко отыскать такое его значение, при котором кривая (рис. 2) пройдет через начало координат или по крайней мере вблизи него. 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 несильно 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-

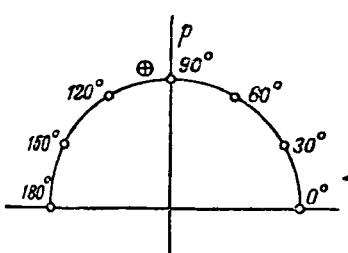


Рис. 1.

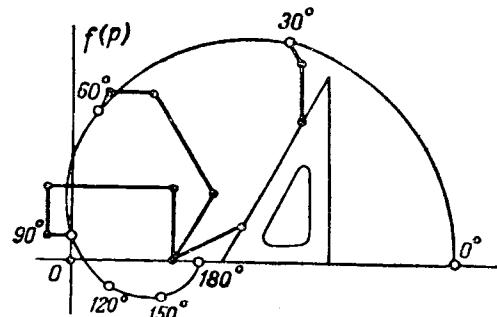


Рис. 2.

ентов a и b (т. е. для приращений Δa и Δb), которые превратили бы остатки m и n в нуль, а именно:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta m_1 \cdot \Delta a + \Delta m_2 \cdot \Delta b = -m, \\ \Delta n_1 \cdot \Delta a + \Delta n_2 \cdot \Delta b = -n, \end{array} \right\} \quad (5)$$

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:

$$\Delta m_1 = \frac{m_1 - m}{\Delta_1} = -1,4; \quad \Delta n_1 = \frac{n_1 - n}{\Delta_1} = 1,5;$$

$$\Delta m_2 = \frac{m_2 - m}{\Delta_2} = -1,2; \quad \Delta n_2 = \frac{n_2 - n}{\Delta_2} = -1,3;$$

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 заданного уравнения, получаем уже не остатки:

$$m' = 0,028; \quad n' = -0,007.$$

Подставив эти значения в правые части у

$$n' = 0,014; \quad \Delta b' = 0,008.$$

Следовательно, вместо (8) надо взять точное выражение:

$$p^2 + 0,281p + 1,209.$$

После нескольких таких поправок по окончательно:

$$p^2 + 0,278p + 1,207,$$

а после деления на него левой части зад

уравнения получаем

$$p^2 + 1,722p + 3,314.$$

Таким образом, корни заданного ура

будут:

$$p_{1,2} = -0,139 \pm j1,090,$$

$$p_{3,4} = -0,861 \pm j1,604.$$

Степень уравнения не ограничивает в

ности 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

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

Описывается 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 4 лет: не наблюдалось

отповедания стен, не было отказа в работе счетчиков, а также не было аварий и обрыва оборудования из-за того, что под

цельнометаллические, а не кирпичные.

ое распределительное устройство, рассчитанное на пропускную способность до 20 000 ква, ся самостоятельной юкой. Оно может устанавливаться к любому юму или вспомогательному помещению, расположенному на любое количество этажей и выполняется в различных вариантах.

первому варианту,льному на рис. 1, распределительное устройство комплектуется из отдельных металлических камер и имеет то же конструктивное расположение аппаратуры и тем же, что и металлические сборные камеры, установленные в системе

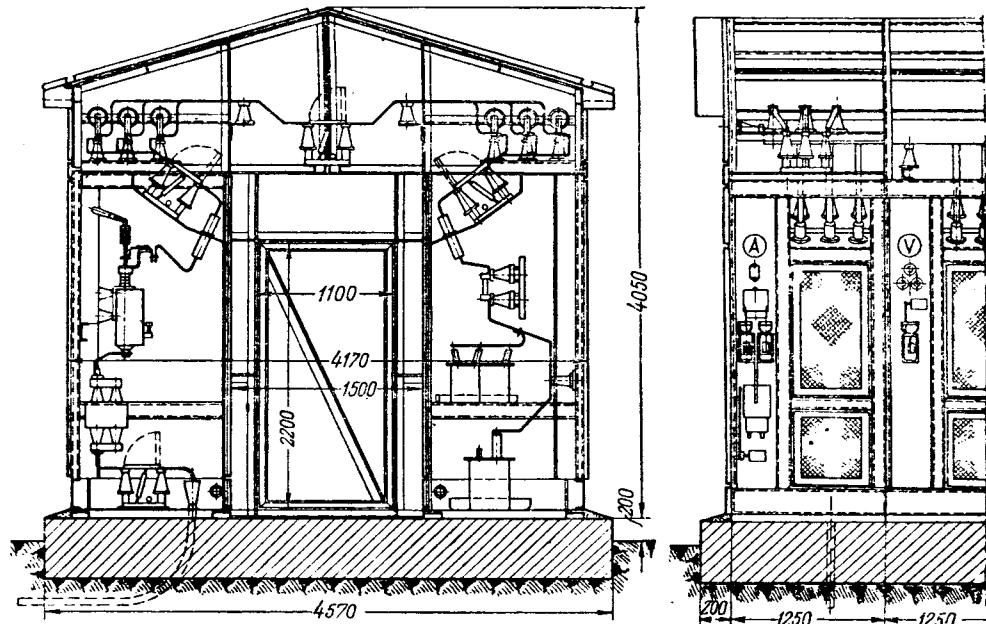
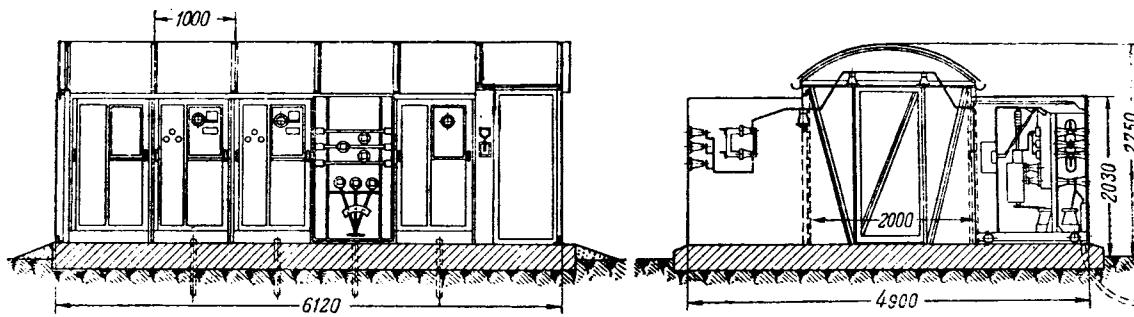


Рис. 1. Металлическое распределительное устройство 6—10 кв из сборных камер.

Металлическое распределительное устройство 10 кв из выдвижных шкафами и штепсельными приемниками к шинам.



штампованные для изготавления в централизованных мастерских. Торцевые части распределительного устройства и крыша обшивается сталью. Кирпичные стены отсутствуют. Второму варианту, показанному на рис. 2, распределительное устройство комплектуется из выдвижными шкафами и штепсельными приемниками со сборными шинами, что позволяет осуществлять быструю смену электрооборудования. Конструкция является сравнительно компактной, требует меньше места и является более удобной при эксплуатации. В обоих вариантах распределительных устройств в камерах могут быть смонтированы аппараты типов ВМГ-133 или ВГ-10, трансформаторы напряжения, разрядники и пр. Конструкции допускают секционирование сборных шин с помощью ключа или разъединителя.

Металлические камеры (шкафы) изготавливаются комплектно со всеми аппаратами, приводами и вспомогательными устройствами в мастерских или на электромеханических заводах. Измерительные приборы и реле могут устанавливаться на фасаде камер, специальных щитах или вынесены в щитовые помещения. Установленном виде, с отрегулированной аппаратурой, камеры и все строитель-

ные детали перевозятся на место и устанавливаются на подготовленных фундаментах или бетонных плитах.

Поддерживающие и строительные конструкции распределительных устройств состоят из отдельных узлов и блоков сборного типа, заготовляемых также в мастерских или на заводе.

Выводы. Цельнometаллические распределительные устройства и подстанции по сравнению с такими же устройствами, но с кирпичными стенами имеют ряд преимуществ:

1) не требуют разнообразного и большого количества строительных материалов и рабочей силы разных специальностей;

2) позволяют изготавливать распределительные устройства полностью заводским путем, осуществлять скоростные и индустриальные методы производства строительно-монтажных работ;

3) способствуют быстрейшему вводу в эксплуатацию 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 устройства на территории предприятия без крупных дополнительных затрат.

[15.9.1950]

Стандарты и нормы

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. *Межполюсная 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 расположенная 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 падающей массы.

136. *Пружинный привод*. Силовой привод, работающий на управление а. в. н. за счет энергии предварительно заведенных пружин.

137. *Инерционный привод*. Силовой привод, работающий на управление а. в. н. за счет энергии приведенного движения маховых масс.

138. *Пиропривод, привод с взрывным зарядом*. Пиропривод, рассчитанный на управление а. в. н. за счет энергии, выделяемой при горении взрывчатого вещества.

139. *Электромагнитный привод*. Электрический (п. 138), производящий включение а. в. н. за счет энергии электромагнита.

140. *Электротяговый привод*. Электрический привод, производящий управление а. в. н. посредством тягового двигателя.

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 оператора прилагается к рукоятке или рычагу.

144. *Маховичный привод*. Ручной привод, в котором усилие оператора прилагается к маховику.

145. *Свободное расцепление*. Устройство в а. в. н., позволяющее подвижным частям аппарата расходиться с частями приводного механизма, связанными душищими элементами привода (например, рукояткой двигателя).

146. *Встроенное реле*. Встроенное в коммутацию а. в. н. первичное или вторичное реле, воздействующее на устройство автоматического отключения аппарата при данном изменении режима.

147. *Электромагнит отключения*. Встроенный в пакет а. в. н. электромагнит, воздействующий на отключение аппарата по команде реле или оператора.

148. *Встроенное реле максимального тока*. Встроенное в пакет а. в. н. 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 минимум 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. Контрполюс (электромагнита); стоп. Выступающая часть ярма электромагнита, к которой притягивается якорь.

155. Защелка (включения). Устройство (механизма) 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 для подачи команды на включение и отключение а. в. н.

158. Контактный ряд (зажимный ряд). Набор однотипных зажимов для присоединения контрольной проводки к управлению а. в. н.

159. Блокзамок. Устройство (механическое или электрическое), обеспечивающее защиту от неправильной последовательности коммутационных операций.

160. Блокконтакты. Вспомогательные контакты, сбрасываемые с а. в. н., размыкающиеся или замыкающиеся в зависимости от 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 номинальных режимах работы.

162. Данные испытания а. в. н. Данные, полученные при испытании 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 и данные испытания а. в. н., определяющие его способность 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., влияющие его работу в тепловом отношении при длительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах (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., предназначенные 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 спомощью коммутационного а. в. н. (коммутационной спомощью а. в. н.). Номинальные данные и данные испытания коммутационного а. в. н. в отношении его способности отключать и включать цепь тока высокого напряжения в заданных циклах и в предписанных нормами.

172. Номинальный ток а. в. н. Наибольший стандартный ток для работы при котором предназначен аппарат.

173. Номинальное напряжение а. в. н. Наибольшее из трех линейных напряжений, для работы при которых 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. Пополюсное (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, приложение 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 волн стандартной формы, приложение 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. Гарантируемая импульсная прочность. Наибольшая амплитуда импульса стандартной волны, приложение которой в стандартных условиях 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 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 скружающей 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.

П р и м е ч а н и е. Предельный сквозной ток а. в. н. определяется его амплитудой и эффективным значением, причем при установлении гарантированного поставщиком предельного сквозного тока а. в. н. его коэффициент амплитуды принимается равным 1,73, а при испытании определяется в зависимости от относительного содержания апериодической 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 апериодической 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).

П р и м е ч а н и е. 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 односекундный 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 с.²

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 а. в. н. при напряжении, равном номинальному.
 208. Предельный ток отключения. Наибольшее тока отключения а. в. н. при напряжениях ниже и выше.

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 промежутка времени. Эффективное значение линейного напряжения основной частоты восстанавливающегося напряжения отключения в многофазных цепях — среднее из трех фаз.

212. Частота собственных колебаний сети. Частота собственных колебаний, обусловленных емкостями и индуктивностями, возникающих на контактах коммутационного аппарата после отключения в предположении, что процесс отключения происходит в идеальных условиях, т. е. что сечение дугового промежутка изменяется от нуля до бесконечности в момент естественного прохождения тока нуль.

213. Скорость восстанавливающегося напряжения. Большая или средняя скорость нарастания восстанавливающегося напряжения от момента погасания до первого пика напряжения.

214. Длительность дуги коммутационного а. в. н. Промежуток времени от момента расхождения контактов коммутационного а. в. н. до момента окончательного гашения дуги.

215. Ток включения. Гарантируемый для коммутационного а. в. н. ток, который он может включать при стандартных условиях включения и при стандартном испытания при данном напряжении сети.

5. Механические характеристики коммутационных а. в. н.

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 гашения 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 тяг аппаратов и углом поворота его вала (или же диска 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 и отключении.

221. Момент на валу а. в. н. Наибольшее значение врачающегося момента на основном валу коммутационного а. в. н. при медленном неоперативном включении.

222. Обратный момент на валу а. в. н. Величина врачающегося момента на валу, необходимая для удержания подвижной части коммутационного а. в. н. при его включенном положении.

223. Статическая характеристика включения и отключения. Зависимость врачающегося 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 тяг при отключении коммутационного а. в. н., например в момент расхождения дугогасительных контактов.

225. Скорость включения (в момент касания контактов или др.). Скорость траверсы или подвижных тяг

включения коммутационного а. в. н., например, от касания дугогасительных контактов.

Динамическая характеристика включения и отключения. Зависимость момента от угла поворота или усилителя при включении и отключении коммутационного а. в. н. со скоростями, соответствующими работе его ма — с учетом сил инерции, но без учета сил от отрыва замыкания.

Кривые скорости включения и отключения. Зависимости 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. Явное приведение в действие коммутационного а. с его приводом для проверки надежности егошин в механическом отношении.

Физические характеристики отдельных видов а. в. н.

Защитная характеристика предохранителя высокого напряжения. Зависимость времени отключения с увеличением дуги предохранителя высокого напряжения отключаемого тока при данном напряжении.

Номинальный ток предохранителя. Наибольший из трех токов плавких вставок, применяемых в пределах данного типа.

Номинальный ток плавкой вставки предохранителя. Указанный на плавкой вставке предохранителя, на которой она предназначена. Ток отключения предохранителя при данном напряжении. Наибольший ток короткого замыкания сети (который мог бы произойти при шунтированном предохранителе), при котором гарантируется надежная работа предохранителя при данном напряжении.

Реактивность реактора в омах. Реактивное сопротивление реактора при номинальной частоте в омах.

Относительная реактивность реактора. Отношение напряжения на реакторе при номинальном токе к полному фазовому напряжению реактора:

$$X = X_{\Omega} \cdot \frac{I_n \cdot \sqrt{3}}{U_n} \text{ в долях единицы,}$$

$$X_{\%} = X_{\Omega} \cdot \frac{I_n \cdot \sqrt{3}}{U_n} \cdot 100 \text{ в процентах.}$$

Пробивное напряжение разрядника. Наименьшее значение промышленной частоты или импульсное, при котором разряжается разрядник.

Сопровождающий ток разрядника. Ток промышленной частоты, протекающий через разрядник после пробоя разрядника.

Наибольший ток отключения выхлопного (трубчатого) разрядника. Наибольшее гарантированное значение отключаемого выхлопным (трубчатым) разрядником разряда, препятствующих его дальнейшей работе.

238. *Наименьший ток отключения выхлопного разрядника.* Наименьшее гарантированное значение тока, при отключении которого в выхлопном разряднике происходит гашение сопровождающего тока.

239. *Остающееся напряжение на вентильном разряднике.* Падение напряжения на вентильном разряднике при прохождении через него наибольшего гарантированного 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 гарантированных 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. Теплоэлектропроектом 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 прейскурантным данным 1949 г., для 15 и 20 кв калькулировались на основе конструктивных расчетов, для генераторов, кроме того, рассчитывались и значения к. п. д.

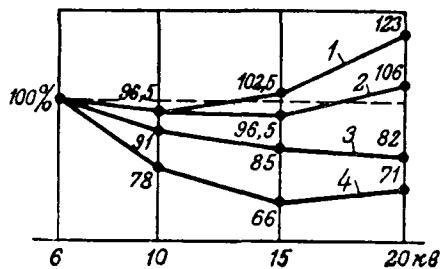


Рис. 1. Процентные соотношения удельных показателей по сетям 6—20 кв районных подстанций.

1 — капиталовложения; 2 — эксплоатационные расходы; 3 — потери энергии; 4 — расход цветного металла.

За 100% приняты удельные показатели по сетям 6 кв: капиталовложения — 430 руб./квт; потери энергии — 6,3% квт; вес цветного металла 11,2 кг./квт; эксплоатационные расходы — 83 руб./квт.

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 I

Соотношение стоимостей (%) и значения к. п. д. генераторов

Мощность, кват	Напряжение, кв		
	10	15	20
25 000	102 97,55	110 97,36	125 97,1
50 000	100 97,72	105 97,71	—

Примечания: 1. Верхние цифры — стоимости; нижние цифры — значения к. п. д.
2. Для мощностей 12 и 25 тыс. кват за 100% принята стоимость генератора 6 кв, а для 50 тыс. кват — 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 гающего роста заводских цен на оборудование, около половины затрат на сетевые сооружения к строительно-монтажным расходам, сравнимых с увеличением напряжения в пределах 20 кв.

Повышение генераторно-распределительного хозяйства, очевидно, может быть выгодно до такого уровня, которое удорожания оборудования еще не превышают экономического эффекта, получаемого в результате изменения числа и сечения кабельных линий и снижения энергии и расхода цветного металла.

Соотношение стоимостей трансформаторов с номинальным напряжением 6—20 кв (%)

Пределы мощности, ква	Напряжение, кв		
	15	20	6
100—180	108	112	100
320—1 000	105	110	100
1 800—5 600	102	108	100

Примечания: 1. За 100% принята стоимость трансформатора 10 кв.

2. Коеффициент полезного действия трансформаторов независящим от первичных напряжений — 6—20 кв.

3. Стоимость трансформаторов 35—110 кв с вторичными напряжениями 6, 10, 15, 20 кв принималась одинаковой.

Соотношение стоимостей аппаратуры (%)

Аппарат	Напряжение, кв		
	15	20	6
Выключатель серии МГГ . . .	125	—	—
Выключатель серий ВМГ и МГФ	135	—	—
Выключатель нового типа 20 кв	—	—	—
Трансформаторы тока разных типов	110—120	125	—
Разъединители	130	—	—

Примечания: 1. За 100% принята стоимость аппарата 15 кв.
2. Предполагается, что для напряжения 15 кв могут быть типы выключателей ВМГ и МГФ; для 20 кв взамен их необходимой новой конструкции выключателей.

Экономические показатели систем распределения по кабельным сетям 6—20 кв. Повышение напряжения распределительных сетей энергосистем приводит к расширению зоны экономичного охвата нагрузок, укрупнению сетевых районов и сокращению числа районных центров. Сравнительный анализ систем распределения по сетям 6—20 кв, строго говоря, должен был быводиться с учетом изменения схем построения сете-

Таблица 4
Изменение стоимостей и весов цветного металла кабелей (%)

Напряжение, кв	10	15	20
Изменения 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

Замечание: 1. Верхние цифры — усредненные для смежных стоимостей, а нижние — веса цветного металла.
2. 100% приняты цены и веса металла для кабелей 6 кв.
3. Кабели 15 и 20 кв предполагалась новая конструкция с экранированными жилами.

Последняя учтена 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 сечение сетей 35—110 кв, в зависимости от конкретной той или иной энергосистемы. Вследствие этого проведенное исследование ограничено рассмотрением схем электроснабжения потребителей на генераторном направлении, иначе говоря, анализировалась совокупность по электрической части источника питания, питающей 6—20 кв и распределительным заводским коммунальным сетям. Условие неизменности схемы сетей 6 кв является допущением, невыгодным для варианта повышенного напряжения. Поэтому, если в результате элементарного анализа определяются благоприятные для одного из повышенных напряжений, практических условиях построения системных сетей этого напряжения должны проявиться, очевидно, же.

Техника проектирования и строительства кабельных линий обязывает общность основных принципов их коммуникации большинства отраслей промышленности, что отражается и на городских коммунальных сетях.

Позволило проанализировать удельные расходы в зависимости от основных влияющих факторов предприятий, расстояния до источника и процентной величины нагрузки крупных электростанций, а для коммунальных сетей в зависимости от плотности нагрузки.

Вновь расчесов была принята широко применяемая схема электроснабжения промышленных предприятий, включением энергии по цехам через коммутационные соединимые с источником питания раздельно различными кабельными линиями. Рассматривались случаи предприятий с нагрузками от 3 до 25 тыс. квт и понижательных подстанций районного и, а также от собственных промышленных станций. Расходы по электростанциям определялись в соответствии с условиям ТЭЦ высокого давления с генераторной мощностью по 25 тыс. квт. Расчеты велись для длины питающих линий, принимаемой равной 1,25 км от случая пит员ия по районной и 1,25 км от собственной или подстанции. Среднее расстояние от зданий до коммутационных пунктов принималось в соответствии с тем, что производился расчет затрат на кабельные кабели разных сечений. По коммунальным удельным расходам определялись применительно к районам с многоэтажной застройкой. Средняя удельная расходов определялась из расчета, что полная нагрузка складывается на 80% из нагрузок массивов с погонной плотностью 0,2 квт/м и на 20% нагрузки жилых массивов с погонной плотностью

Таблица 5
Допустимые и экономические нагрузки одиночного кабеля, проложенного в траншее, ква

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 м.м², для 15 кв — 16 м.м², для 20 кв — 25 м.м².

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	420	руб/квт	96,5	102,5	123
	530		98	103	121
Потери энергии	6,3%		91	85,5	82,5
	9,4%		96	9+	94
Расход цветного металла	11,2	кг/квт	78,5	66	71,5
	12		80	67	71
Эксплоатационные расходы	83	руб/квт	96,5	96,5	106
	121		98	100	107

б) Сеть подстанции или станции крупного предприятия

Капиталовложения	320	руб/квт	103	108	120
	430		103	109	123
Потери энергии	5,65%		94,5	90,5	87,5
	8,7%		99	98	98
Расход цветного металла	7,1	кг/квт	86	74,5	74,5
	7,9		86	75	74,5
Эксплоатационные расходы	72	руб/квт	98,5	99,5	105
	109		101	10+	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 эксплоатационных расходов стоимость потерь электроэнергии исчислялась по 16 коп/квт; ежегодные отчисления на amortизацию, ремонт и обслуживание принимались 6% от капитальных затрат на кабельные линии и 11% 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, слагающейся 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 разновременности 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 увеличиваются в обратной зависимости от величин коэффициентов одновременности. Изменение удельных показателей с ростом напряжения сети иллюстрируется кривыми рисунка,строенными на основе данных табл. 6 для случаев питания потребителей от районной подстанции (соответственно верхними цифрами 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 криодик, 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) капиталовложение 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 впением кабелей 20 кв сечением менее 3×25 ченным весом свинцовой оболочки, что скажет возрастании расхода цветного металла в рабочих сетях. В питавших сетях 20 кв не достигается ственного снижения расхода цветного металла с 15 кв, так как нагрузки отдельных питающих в большинстве случаев не настолько велики, ход от напряжения 15 к 20 кв мог привести к числа питавших кабелей и чаще дает лишь сечения. Между тем, наиболее эффективное снижение капиталовложений, так и веса цветного металла получается именно при сокращении числа линий.

Таким образом, результаты показывают, что по расходу цемента и потерям энергии повышения напряжения кабельных сетей для широкого круга потребителей оправдывается, и тем более вне этого напряжения не оправдываются показателям капиталовложений по эксплуатационных расходов, которые сетей 20 кв получились значительнее, чем для напряжений 6—15 кв.

Правильное решение вопроса выбора стандарты напряжений в диапазоне 6—35 кв заключалось в равномерном ее заполнении ступенями 6—10—20 кв в определении такого дополнительного напряжения, которое: а) пропускная способность кабелей хорошо сочеталась с масштабами нагрузок питающих и потребительских сетей; б) обеспечивались бы возможность номичного кустования районных сетей энергосистем; в) создавались бы условия изготовления аппарата структурно аналогичной аппаратуре 6—10 кв, условия быстрого освоения выпуска генераторов можно малом отличии в ценах и величинах к.п. сравнению с генераторами 6—10 кв.

Этим условиям в наибольшей степени удовлетворяет напряжение 15 кв. Пропускные способности кабелей большого сечения — 7 000 ква и малого сечения — 2 перекрывают обычно встречающиеся нагрузки от тяговых и распределительных линий. Дальность доставки энергии по кабельным и воздушным линиям и мышленно-коммунальных сетей может достигать 15 км. Напряжение 15 кв, в отличие от напряжения 20, хорошо сочетается с твердо упрочившимися 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 снижение 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 последнее напряжение должно получить наибольшее распространение, исключив применение напряжения 20 кв.

Результаты анализа показывают целесообразность внедрения напряжения 15 кв, для замены во вновь ваемых сетях напряжения 10 кв. Отмеченное склонение к проекте нового ГОСТ напряжение 10 кв следует распространить не только на крупные генераторы 100 тыс. но также на аппаратуру, кабели и генераторы мощностью 12, 25 и 50 тыс. квт, не включая в стандарт напряжение 20 кв.



10 страницам технических журналов

ИСЛЕДОВАНИЕ СВАРОЧНОЙ ДУГИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ В ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Зашитная газовая среда может употребляться при сварке тогда, когда присадочный металл не является в то же время одним из электродов сварочной. В этом случае шлаковая защита сварочной ванны плавления и азотирования под воздействием воздуха несет газовой защитой; для образования сварочной обволакивающей основной металл (и присадочный), оба электрода берутся вольфрамовые или угольные, вследствие своей тугоплавкости, не переходящим состояния в сварочную ванну.

В настоящей работе произведено сравнительное исследование свойств водорода, аргона и их смесей в качестве газовых сред с точки зрения воздействия их электрические характеристики дугового разряда большей мощности (200—1 000 а).

Проведенных опытах дуга возбуждалась между электродом — катодом (диаметр 15 мм) и горизонтально расположенной пластинкой из малоуглеродистой анодом.

При дуге производилось от генератора постоянного 60 в, 1 000 а. Водород и аргон поступали из в особую камеру у конца электрода, которая имела щель для выхода газа, создававшего во- газообразную завесу. В первой серии опытов защитной средой был аргон, которого менялся от 7 до 20 л/мин. Стальная пластина перемещалась со скоростью 1,8 см/сек. На оставался след расплавленного металла в виде белой полосы с гладкой или неровной поверхностью газовыми раковинами или без них. Ширина полосы приближительно пропорционально току напряжения и тока записывалась магнитоэлектрическим осциллографом. Управление всеми операциями опыта производилось автоматически. В опытах было установлено, что достаточной величиной расхода аргона для заметного качественного процесса по сравнению с незащищенной дугой расход в 7 л/мин.

В водороде. При расстоянии отверстия для пластины, равном 25 мм, достаточный расход оказался 3,5 л/мин. В водороде дуга не-

использована смеси водорода и аргона. Наибольшей дуге была в смеси водорода 3,5 л/мин и 3 л/мин. Хотя наилучшей устойчивостью обладала защищенная аргоном при расходе в 7 л/мин, ее высокую стоимость этого газа, применять ее экономически невыгодно. Поэтому заслуживающего интереса смеси из аргона и водорода в качестве защитного газа совмещают в селективные химические свойства водорода и благоприятственные 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

$$N_T = (N_{T2}^o h_2 - N_{T2} h_2) \beta_2 - \left(\pm \frac{n_2}{n_3} \right).$$

Уравнение (12) для нахождения величины мощности гэс, которую целесообразно передавать по межсистемной линии связи:

$$N_{T3} = N_{T2} (h_2 \beta_2 - 1) + N_{T2}^o (1 - \beta_2 h_2) \pm \frac{n_2}{n_3}.$$

N_{T2} — участие гэс, расположенных в системе 2 (принимающей энергию гидроэлектростанций), в покрытии максимума нагрузки этой системы; N_{T2}^o — участие гэс в покрытии нагрузки системы 2; h_2 — продолжительность использования нагрузки системы 2, покрываемой гидроэлектростанциям, входящим в эту систему; h_2^o — продолжительность использования нагрузки системы 2, покрываемой гэс, при наличии объединения; β_2 — коэффициент, характеризующий конфигурацию графика нагрузки системы 2, равный числу часов использования пиковой и полупиковой 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 коммутировать, 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 петушка, 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.

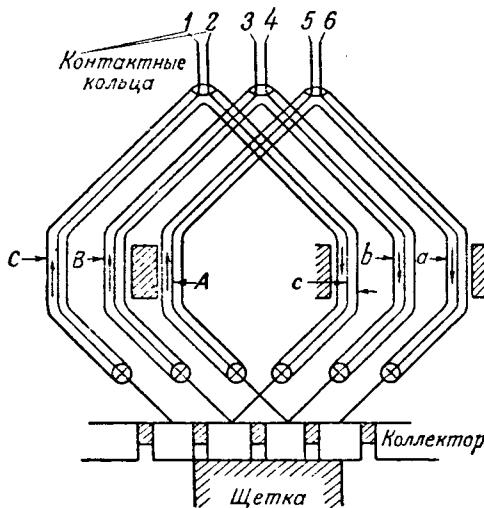


Рис. 1.

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 A. Изменение

разности потенциалов контактных колец во времени может быть принято пропорциональным изменению тока коммутации секции. Соответственно разности потенциалов контактных колец 3 и 4 пропорциональны изменению тока в секции B, а между кольцами 1 и 2 — в секции C.

С помощью этих же измерительных проводников можно изучить изменение напряжения между смежными коллекторными пластинами, если сделать допущение, что в всех проводниках одного паза индуцируется одна и та же величина э. д. с. Как известно, индукция в коммутационной зоне незначительна. Поэтому такое допущение не вносит серьезных погрешностей.

На рис. 1 видно, что напряжение секции A действует между кольцами 4 и 6, секции B — между кольцами 2 и 4 и секции C — 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 смежными коллекторными пластинами, которые соединены с исследуемыми секциями.

На осциллограммах 1—3 и 10—12 кривые сдвигнуты относительно друга по вертикали для облегчения рассмотрения полученных мгновенных значений напряжений. Подлинное расположение по вертикали токов и напряжений дано на осциллограммах 4 и 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 дополнительных полюсов или, другими словами, при «перекомпенсации». Осциллограммы 3, 6, 9, 12 получены при противоположных условиях — «недокомпенсации».

В обоих последних случаях — «перекомпенсации» и «недокомпенсации» — наблюдалось значительное искрение.

Наилучшая компенсация обнаружила искрение на баллах.

Отсчет времени на осциллограммах производится вправо. Поэтому исследуемые секции подвергаются коммутации в алфавитном порядке. Секция A — первая и C — третья. Масштаб времени предложен четвертой линией на осциллограммах рис. 2. Отрезки

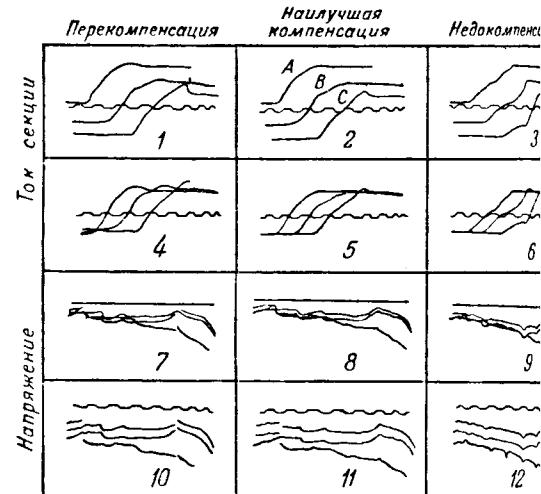


Рис. 2.

линии измерены в масштабе единиц коллекторных пластин. Для получения этого масштаба применялись щетки, которые крепились к щеткодержателю.

Такие же осциллограммы были получены при нагрузке 450 а и скорости вращения $n = 1950$ об./мин. В этом случае при «наилучшей» компенсации коммутации была темной. При «перекомпенсации» и «недокомпенсации» также наблюдалось значительное искрение. Для наглядности осциллограммы рис. 2 вычерчены в

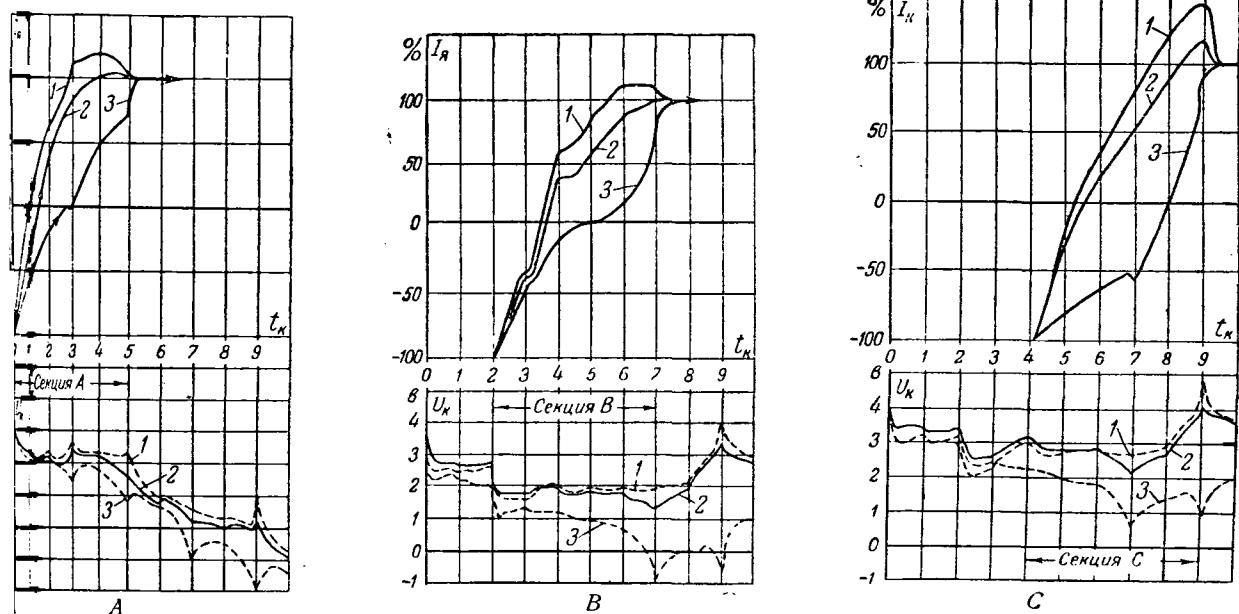


Рис. 3.

— три коммутации в процентах от тока якоря; U_k — приближенное значение напряжения между смежными ламелями; t_k — время, соответствующее 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.

вых координатах на рис. 3, А, В, С. Эта серия рисунков показывает скорость изменения токов коммутации в единицах времени.

На рассмотрении этих осциллограмм следует определить момент, в который исследуемая секция щеткой накоротко или размыкается и соответствующий момент для другой секции, способной оказать влияние на изменение тока или напряжения в изучаемой

секции. Единицы времени на рис. 3 служат проекциями времени, в течение которого коллектор поворачивает на половину ламели. Рис. 4 иллюстрирует фазы ползамыкания секций А, В и С.

Начнем с первых токов. Руководствуясь порядком следования времени и фаз якорных секций, принятым на рис. 3, легко обнаружить причины большинства измеренных кривых токов. Секция А первая начинает ползать ток в направлении часовой стрелки. Следующими будут коммутировать две другие секции в алгоритме порядка. Секция А замыкается накоротко в момент 0, и короткое замыкание этой секции наступает в момент 5, секция В замыкается накоротко в момент 2 и размыкается в момент 7, соответствующие моменты для секции С будут 4 и 9.

Момент 9 отмечает время окончания коммутации исследуемой секции. Точка 6 соответствует нулевой точке катушки.

Если в катушках дополнительных полюсов отреагировать на «наилучшую» компенсацию, то при этом ток изменяется с такой скоростью, чтобы по прошествии короткого замыкания достичь величины, соответствующей зерновому 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, особенно в случае «перекомпенсации», нарушается это условие. В обеих секциях (А и С) ток короткого замыкания не достигает тока нагрузки двигателя в момент выхода щетки. Осциллограммы иллюстрируют наилучшую компенсацию и для случая так называемой «перекомпенсации».

На рис. 3 явно обнаруживаются последствия слабого дополнительных полюсов, т. е. «недокомпенсации». Изменяющаяся секция не успевает достичь требуемого по истечении времени короткого замыкания. Здесь обнаруживается как кривые тока, так и кривые напряжения.

Скорость, с которой ток секции изменяется в течение периода коммутации, зависит от величины потока дополнительных полюсов и от взаимоиндукции 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 накоротко. 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 перед секцией 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

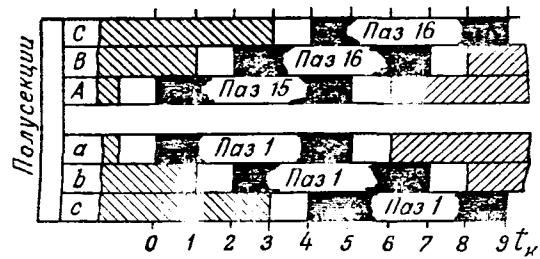


Рис. 4. Периоды коммутации секций (зачернены).

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 приблизительная поправка — 5%. Таким образом, показанные абсолютные значения на рис. 3 следует считать приближенными. Интерес также представляет влияние, оказываемое измене-

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?

Осциллографы 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 «излучающей» 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. Красав «Исследование 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. M. J. Baldwin)

Кандидат техн. наук Л. М. ШИЛЬДИНЕР

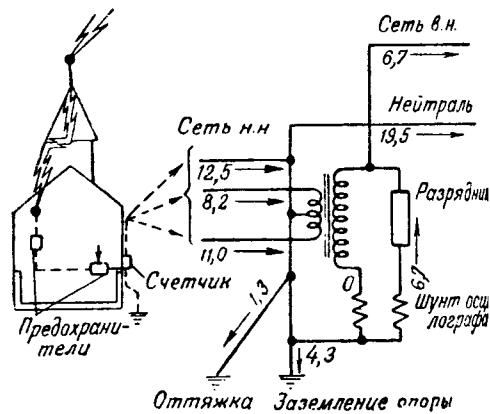
ИССЛЕДОВАНИЕ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕЛЬСКОЙ СИСТЕМЕ

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 потребитель-

ских трансформаторов, защищенных деионными ками. В этом районе число грозовых дней составляет 36 до 48 в год.

Полярность и величина разрядных токов измерялись магнитными регистраторами с пределами измерения до 30 ка. Разряды измерялись также автоматическими осциллографами. Сопровождающие и токи регистрировались автоматическими магнитными осциллографами. Часть деионных разрядников были оборудованы магнитными регистраторами, снятые после каждой грозы. Данные исследований разрядника-лета в линии длиной 13,6 км показали, что разряд часто вызывает действие нескольких разрядников. Один крупный разряд вызвал срабатывание всех разрядников на линии в 5 км.

По данным магнитных регистраторов 40% разрядов срабатывали один раз в год, 19% два раза, 6% три и 2,7% — четыре раза и более. В среднем разрядник приходилось 1,1 раза срабатывать в год. В год 0,36% всех разрядников имели разрядный ток 30 ка, 50% менее 0,2 ка и 67% менее 0,1 ка. За 8 лет (1944—1951) 120 разрядов достигли трансформатора, вызвав 86 срабатываний разрядников. Наиболее разряд, отмеченный 17-ю регистраторами, прошел через колокольню церкви и проник в систему водопровода низкого напряжения. На рисунке показаны направления отрицательного разряда и величины высших токов в ка. В обмотке высшего напряжения трансформатора тока не было вследствие этого весь ток прошел через разрядник.



Путь разряда в шпиль колокольни и величины токов на трансформаторном пункте в ка.

Осциллограмма тока в разряднике показала его падение с 6,7 ка в первые 0,003 секунды, так как максимальный пик тока 6,7 ка был слишком велик для магнитного регистратора, был записан на ленту. Ток упал до 0,003 ка. Затем последовало шесть повторных импульсов с пиком тока менее 0,09 ка, прекратившихся через 0,003 секунды. (E1. Engineering, т. 68, № 9, 1949. Transactions AIEE, т. 68, ч. 1, 1949. D. D. Mc Cartny, D. A. Stann, R. M. C. McKinley).

Доктор техн. наук И. А. Борисов

ПРОДОЛЬНАЯ ЕМКОСТНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

(Обзор)

Фактическая способность электропередачи высокого напряжения в значительной мере определяется условиями работы параллельной системы, в свою очередь, зависят от ряда факто-частности, от величины реактивного сопротивления электропередачи. Одним из методов увеличения способности электропередачи является продольная емкостная компенсация линии путем последовательного включения статических конденсаторов, что уменьшает реактивное сопротивление линии передачи и эквивалентно сокращению ее длины.

Последовательное включение статических конденсаторов позволяет выбрать номинальное напряжение, значительно меньшее рабочего напряжения приемлемой линии, изолировав корпусы конденсаторов на землю.

В этом случае номинальное напряжение статических конденсаторов будет определяться падением напряжения на конденсаторе при протекании через него рабочего тока передачи.

В возрастании тока, например, вследствие короткого замыкания будет возрастать и напряжение на конденсаторах. При коротком замыкании на участке линии, не компенсированной конденсаторной установкой, напряжение на конденсаторах может настолько возрасти, что приведет к их пробою.

Вследствие увеличения токов короткого замыкания для широководной 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 60%.

Чтобы избежать пробоя конденсаторов при возрастании напряжения, должны быть предусмотрены защитные меры. В осуществленных и проектируемых установках для продольной емкостной компенсации в качестве защиты конденсаторов применяются устройства, шунтирующие конденсаторы при повышении напряжения (разрядник, а также выключатель). Разрядник должен подействовать и отзвинтить конденсаторы в течение первого полупериода короткого замыкания, выключатель же ограничивает время разряда разрядника.

Необходимость шунтирования статических конденсаторов при коротком замыкании определяется тем, что отрицательным моментом этого устройства, так же как и дефектом, декомпенсируется как раз в момент, когда потеря устойчивости параллельной работы станций станции особенно необходима. Это заставляет требовать повышения гарантированного напряжения, которое вынуждает последовательно включенные конденсаторы. Конечно, 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 широководной линии и вне ее — при различных степенях компенсации.

При повреждении на линии вблизи конденсаторов степень компенсации выше 15—30% кратность напряжения на конденсаторах изменяется в пределах 5—6, при удаленном повреждении и при тех же пределах компенсации кратность напряжения на конденсаторах равна лишь 2—3.

На рисунке даётся обзор выполненных установок для продольной компенсации линий электропередачи.

Линия передачи 220 кВ Стадсфорсен—Гальльсберг (Швеция). Эта линия длиной 480 км передает электроэнергию из северной части Швеции в центральную. Применение конденсаторов в середине линии, в пункте Альфта, в электропере-

дачу 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 Сивертса.

В таблице приведены характеристики последовательных конденсаторов, примененных для установки 220 кВ в Альфта.

	ACEA	Сивертса
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.

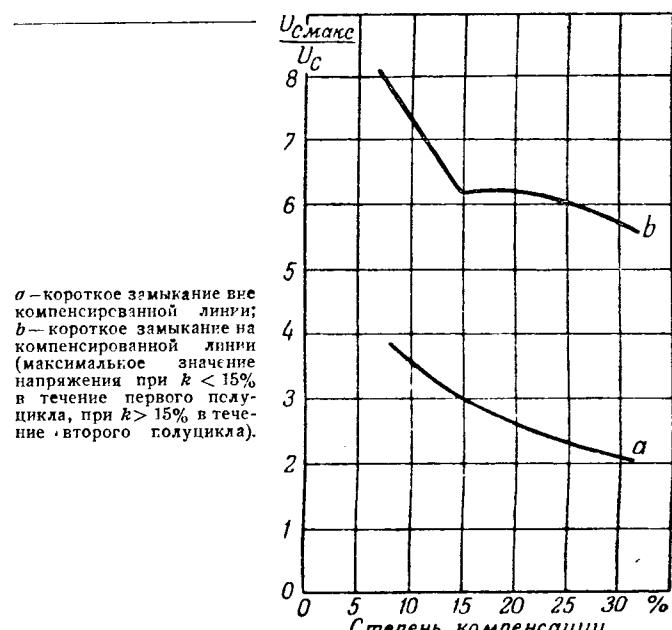


Рис. 1. Максимальные значения напряжения на серийных конденсаторах при коротком замыкании.

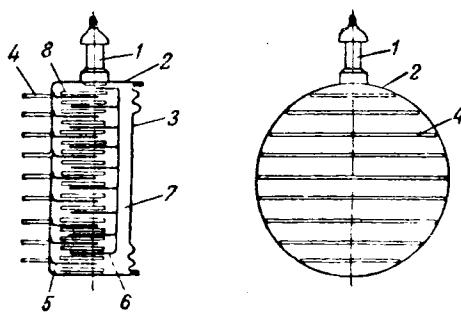


Рис. 2. Схема конструкции единичного конденсатора.

1 — выводной изолятор; 2 — корпус; 3 — крышка корпуса; 4 — охлаждающее ребро; 5 — обкладки, припаянныe 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 мембранны, компенсирующую температурные изменения объема залившего 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 напряжение начала ионизации и значительно увеличить 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 удалено 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 пробою 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 сменять или заменять отдельные конденсаторы. Вес всего устройства составляет 200 т, из них на конденсаторы приходится 75 т. Вес отдельного конденсатора составляет 45 кг, что соответствует 1,36 кг/квар.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

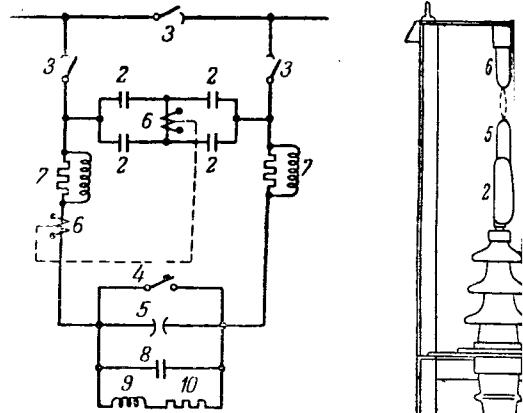


Рис. 3. Принципиальная однофазная схема защиты конденсаторов.

1 — линия 220 кв; 2 — конденсаторы; 3 — разъединитель; 4 — масляный выключатель; 5 — искровой промежуток; 6 — трансформатор тока; 7 — демпфирующий элемент; 8 — защитный конденсатор; 9 — разрядный реактор; 10 — серийное активное сопротивление.

Рис. 4. Защита конденсаторов. 1—2 — металлические тройники; 3 — изоляторы подставки; 4—5 — низковольтные электроды, установленные на металлических подставках; 6 — графитный зонд.

Принципиальная схема защитного устройства приведена на рис. 3. Для защиты конденсаторов в каждой фазе батареи установлен защитный разрядник. Для гашения дуги искрового промежутка разрядника размыкается выключателем, который используется также для эксплуатационных включений и отключений рея. Искровой промежуток разрядника пробивается напряжением 85 кв_{макс}, что соответствует 29 кв напряжению батареи конденсаторов. Устройство раз видно на рис. 4.

При прохождении тока короткого замыкания искровой промежуток от трансформатора тока, установленного в цепи, через реле с выдержкой времени пылится включающий импульс на шунтирующий выключатель, обратный отключающий импульс дается через окончательный включающий импульс. Поскольку 220 кв оборудована быстродействующей релейной 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, помещенный 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 батареи конденсаторов имеет дополнительные устройства вспомогательного назначения: 1) защитный конденсатор 0,1 мкф, предназначенный для отвращения пробоя искрового промежутка волнами мосферных перенапряжений; 2) демпфирующее устройство, предназначенное для гашения заряда конденсаторов при пробое искрового промежутка или включении шунтирующего выключателя; 3) разрядное устройство для разряда конденсаторов за время 0,3 сек при отключении линии 220 кв.

Батарея последовательных конденсаторов, состоящая из четырех групп, включена по схеме, подобной схеме Уитстона, в диагональ которой включен трансформатор тока 220 кв. При повреждении в установке, например при пробое проходного изолятора конденсатора батареи, нарушается и токовая релейная защита и импульс на выключатель, который через 1 сек шунтирует батарею.

Описываемая установка в Альфта продольной емкостной компенсации линии 220 кв была включена в эксплуатацию в январе 1950 г. и успешно прошла пусковые испытания.

Линия 66 кв Филлипс—Крусибл (США). Небольшая линия с последовательно включенными конденсаторами в эксплуатацию в 1947 г. Эта установка с общей ёмкостью конденсаторов 10 000 квар оборудована на линии Филлипс—Крусибл длиной 22,5 км, питающей промышленный завод и имеет целью уменьшить диапазон колебания напряжения в сети. Конденсаторы установлены в специальные, косинусного типа на номинальное напряжение 4 кв, мощностью 15 квар в единице, допускающие кратковременную перегрузку. Защитные размыки выполнены в виде искровых промежутков с гравийными электродами; батарея и разрядники могут быть заменены контактором. Открытая установка конденсаторов выполнена в металлических шкафах, конструкции являются вторым полюсом установки и изолированы землей опорными изоляторами 69 кв. Защитные размыки также установлены в этих шкафах.

Проектируемая линия 380 кв Гарспренгет—Гальльсберг (Германия). 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 километра снижается на 20%.

Заключение рецензентов. 1. Продольная емкостная компенсация является весьма эффективным средством повышения пропускной способности линий передач, требует меньших капитальных затрат и вводит в схему первый элемент, эксплуатационная надежность которого должна быть обеспечена на уровне не ниже надежности остальных элементов передачи.

Сведений о надежности работы установок с продольной емкостной компенсацией еще нет. Имеются лишь сведения о работе статических конденсаторов шунтового соединения для целей улучшения коэффициента мощности. Для последовательных конденсаторов, условия которых тяжелее, требуется повышение их надежности в работе.

Заключение в схему мощной системы передачи последовательно включенного элемента — батареи конденсаторов — вносит новые весьма существенные изменения в передачу, которые изучены совершенно не (материалы, опубликованные в иностранной прессе, весьма скучны и не могут быть использованы для изучения вопроса).

Изучены переходные явления, в частности, коммутация перенапряжения в компенсированных линиях резонансные явления при включении, явления при перенапряжениях, субгармонических резонансов, раскачивания в цепях с последовательными конденсаторами и пр. Требуют изучения вопросы режимов продольной емкостной компенсаций, совместного действия продольной и поперечной компенсации длинных линий, вопросы эксплуатации установок продольной компенсации, совершенно недостаточно проработаны вопросы этих установок.

Полная емкостная компенсация длинных линий является только одним из средств повышения способности передачи, причем достаточно сложным. Советские ученые и инженеры разработали эффективные и экономичные средства повышения производительности параллельной работы, а именно применение существующих безинерционных регуляторов возбуждения, инвертирование синхронных машин, применение возбуждения, применение метода работы синхронизаторов в зоне искусственной устойчивости, применения быстродействующих безинерционных регуляторов напряжения и компаундинга синхронных машин, накоплен значительный эксплуатационный опыт, остальным вопросам проводится интенсивная промышленская работа.

Надо отметить такие меры повышения пропускной способности линий передачи, как специальные характеристики генераторов и применение расщепленных трансформаторов, которые являются простыми и экономичными. Всю область применения для продольной компенсации, должны явиться очень напряженные линии высокого и сверхвысокого напряжения тока, для которых перечисленные выше более экономичные меры повышения пропускной способности недостаточны. С этой точки зрения для 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. Japеке, K. F. Akerstrom. Последовательно включенный конденсатор в шведской сети. *Teknisk Tidskrift*, № 5, II, 1949.
2. Rusk and Rathman. Последовательно включенный конденсатор и расщепленные провода в шведской электропередаче. *El. Eng.*, т. 69, № 1, 1950.
3. O. Japеке and K. F. Akerstrom. 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

(О бзор)

Измерительные трансформаторы на напряжение 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 полизобутилен — синтетический каучукообразный материал, представляющий собой полимер изобутилена. Следует отметить, что в деле создания синтетических каучуков приоритет принадлежит нашей стране: А. М. Бут-

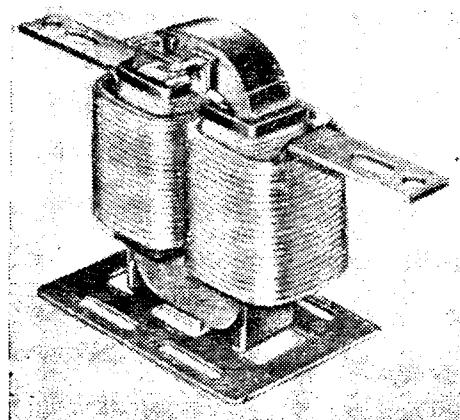


Рис. 1. Собранный трансформатор тока на 5 000 в до опрессовки синтетической изоляцией.

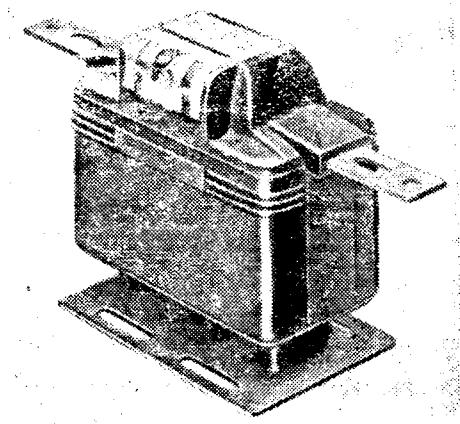


Рис. 2. Трансформатор тока, изображенный на рис. 1, после опрессовки изоляцией на основе бутил-каучука.

леров впервые установил способность изобутилена полимеризоваться и еще в 1869 г. получил первый в мире синтетический каучук — полизобутилен.

Полизобутилен 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 полизобутилена в качестве прессующейся 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-каучуковую 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

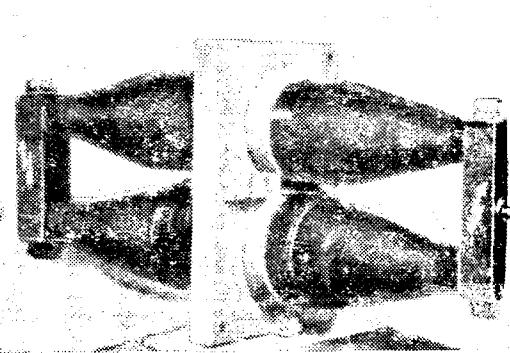


Рис. 3. Проходной трансформатор напряжения с опрессованной синтетической изоляцией

15 кг/см². Бутил-каучук весьма эластичен: удлинение разрыве при комнатной температуре достигает 68% при 30% у битуминизированной бумаги. Это свойство дает трансформаторам с опрессованной изоляцией тил-каучуковой массы весьма высокую устойчивость к сверхтокам, так как они способны выдерживать вращающие при этом механические усилия без повреждений. Необходимо указать на то, что новый вид обеспечивает высокую электродинамическую восторг даже многовитковых трансформаторов токовой мере, в которой этого до сих пор не удавалось достичь. Это объясняется тем, что обмотки подаются из одного ввода до другого, заключены в твердый изолирующий материал и поэтому не могут рваться.

Водопоглощаемость бутил-каучука не превышает 1%. В отношении действия органических растворов он имеет более высокой стойкостью, чем битуминизированная бумага. В противоположность последней, бутил-каучук подвержен действию кислот и щелочей. Он обладает более высокой огнестойкостью, что особенно важно с точки зрения пожаробезопасности электрооборудования, в которых работают измерительные трансформаторы.

Электрические свойства изоляции на основе бутил-каучука достаточно высоки. Пробивная напряженность при температуре 40° составляет 160 кв/см против 140 кв/см у битуминизированной бумаги; при температуре 80° соответствующие значения равны 140 кв/см против 60 кв/см. В отношении диэлектрических потерь бутил-каучук имеет значительное преимущество. Обширные испытания на старение подтвердили высокие свойства термического бутил-каучука. Точно так же он хорошо выдерживает длительное воздействие высокой влажности духа. Испытания бутил-каучуковой массы показывают, что при напряженностях вплоть до 70 кв/см в ней не возникают явления ионизации.

Бутил-каучуковая масса не является, конечно, универсальным типом материала, пригодным для применения в качестве опрессованной изоляции. Дальнейшие исследования в этой области позволят разработать различные специальные материалы с комплексом свойств, необходимых для каждого данного применения этого вида изоляции.

Новый метод изолировки с применением синтетической изоляции из синтетических изолирующих материалов обеспечивает огромные преимущества перед ранее использовавшимися материалами. Кроме вышеуказанного, можно отметить следующее. Прессовка создает высокую точность внешних размеров и создает однородную изоляцию, полностью охватывающую высоковольтную обмотку, заполняющую пространства между обмотками, обмоткой и магнитопроводом и образующую оболочку вокруг всего трансформатора. Улучшенный вид трансформатора и обеспечивается его отсутствием механических повреждений. Уменьшаются габариты трансформатора, что является весьма желательным, особенно с производственной, но и с эксплуатационной точек зрения. Снижается расход активных и конструкционных материалов.

тый вид изоляции позволяет перейти к новым конструкциям исполнения 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 измерений, в пределах которого могут быть изготовлены измерительные трансформаторы в сухом исполнении. Так, уже строятся сухие трансформаторы тока и напряжения для всех номинальных напряжений до 60 кв. В настоящее время измерительные трансформаторы с опрессованной синтетической изоляцией изготавливаются для установки. Однако дальнейшие исследования направлены к выяснению возможности их применения также наружной установки. Однако дальнейшие исследования направлены к выяснению возможности их применения также наружной установки. Однако дальнейшие исследования направлены к выяснению возможности их применения также наружной установки.

Однако дальнейшие исследования направлены к выяснению возможности их применения также наружной установки. Однако дальнейшие исследования направлены к выяснению возможности их применения также наружной установки. Однако дальнейшие исследования направлены к выяснению возможности их применения также наружной установки.

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. Pfeiffer, R. E. Fagge, 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.)

Известным профессором А. В. Берендеевым на страницах журнала «Электричество» вопрос об оценке работ Г. Крона является актуальным и принципиальным, так как существование — это вопрос о применении в практике электротехники тензорного анализа и алгебры. В среде электротехников высказываются спорные взгляды на применение названных разделов математики в электротехнике. Имеются, безоговорочно отрицающие пользу применения тензорного анализа и матричной алгебры. К союзу следует признать, что имеются и лица, пытающиеся открыть в работах Г. Крона чуть ли не новую веху в развитии электротехники. Поэтому опубликованы А. В. Берендеева, вносящей ясность в существующее, необходимо приветствовать. А. В. Берендееву прав, указывая на содержащиеся в работе элементы отнюдь не научного, а рекламного

характера. Этот вопрос сводится к тому, когда имеет смысл применять тензорный анализ с вводимыми в нем понятиями ковариантной производной, символах Кристоффеля.

В задачах, рассматриваемых Кроном, да и некоторыми исследователями, сводится, в конечном итоге, решению систем интегро-дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Машины переменных имеют уравнения равновесия э. д. с. и напряжения, а также уравнений с периодическими коэффициентами, эти уравнения могут быть разрешены только, 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 профессора 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. Кравеца «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 отчество, 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 Иностранный 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 Лейпциг.

Трактат Эпинуса «Опыт теории электричества и магнетизма», объемом в 400 страниц, написанный на немецком языке, никогда не переводившийся и не публиковавшийся, содержит огромный фактический материал, основанный на теоретических расчетах и опытных наблюдениях Эпинуса. В основу теории электричества и магнетизма положены Франклиновы взгляды, предполагающие существование одной электрической жидкости, которой означает положительный заряд, а недостаток – отрицательный. Эпинус отказывается от объяснения природы электрического и магнитного полей, подчеркивая, что это делается потому, что считает этот вопрос еще не решенным, но не потому, что он разделяет взгляды мистической теории «действия на расстояния». Эпинус решительно отвергает всяческие богословские аргументы в этом вопросе. Таким образом, выясняется, что совершенно неизвестны историки науки, которые нередко приписывают Эпинусу защиту теории действия на расстоянии. Раскрытие механизма взаимодействия между электрическими зарядами, задолго до открытия Кулона, его закона, на основе аналогии с тяготением и своих расчетов, предполагающих, что сила взаимодействия должна убывать обратно пропорционально квадрату расстояния.

Крупным вкладом Эпинуса в науку является открытие им электростатической индукции и электростатической поляризации диэлектриков. Благодаря этому открытию Эпинус впервые объяснил, почему изэлектризованный предмет притягивает к себе легкие предметы. Далее Эпинус впервые объяснил действие Лейденской банки, вскрыв ошибку в объяснении этого действия, сделанную Франклином. Эпинус впервые указал, что разряд Лейденской банки должен быть колебательным. Это было установлено спустя 100 лет Феллерсоном.

Эпинус строит теорию магнетизма по принципу электричества. Он полагает, что существует магнитная жидкость, которая удерживается в ферромагнитных телах. Избыток магнитной жидкости обуславливает теории один полюс магнита, недостаток – другой. Несмотря на то, что теория магнетизма Эпинуса содержит ряд слабых сторон и противоречит некоторым экспериментальным фактам (например, отсутствие магнитного поля при разрезании магнита), ему удалось изложить свою теорию ряд ценных выводов. Так, он впервые объяснил, почему магнит притягивает намагниченное тело. Он также объяснил явление саморазмагничивания намагниченных коротких стержней. Далее Эпинус разработал на основе строгих расчетов наилучшие в то время методы намагничивания магнитных стрелок, что представило эпоху крупнейший вклад в практику. Рассматривая магнетизм, Эпинус считает несомненным наличием в ядре магнитного ядра. Эпинус впервые разработал методы для определения величины магнитного поля. Большой интерес представляет рассказ Эпинуса о происхождении залежей магнитного железа. Сообщения Эпинуса в этом вопросе навели на мысль о возможности существования на Земле залежей магнитного железа. Сообщения Эпинуса в этом вопросе навели на мысль о возможности существования на Земле залежей магнитного железа.

Трактат Эпинуса имел огромное значение для науки. О нем одобрительно отзывался итальянский физик Ф. Английский физик Кевендиш 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 было популярное его изложение, причем, крупнейшие французские математики и физики Лаплас и Лагранжказали, что труд Эпинуса должен «создать эпоху фундаментальных наук». Трактат Эпинуса, положивший начало фундаментальным расчетам в теории электричества и магнетизма, явился дальнейшим шагом после работы Рихарда Ломоносова, положивших начало количественным фундаментальным исследованиям электрических явлений.

Начиная по докладу Я. Г. Дорфмана, [академик Б. А. Бавилов] отметил как весьма своеобразный и жесткий факт — предполагаемое Комиссией издание, где с латинского языка на русский язык, трактата «Опыт теории электричества и магнетизма», так и книга, при всех ее недостатках, является узлом в истории развития учения об электричестве. Бавилов рекомендовал Комиссии заняться Эпинусом, в смысле восстановления его образа как в целом, считая, что Эпинус был одним из наиболее крупных физиков XVIII в.

На 59-м заседании Комиссии (председательствовал АН СССР Т. П. Кравец) проф. Д. Б. Гогоберидзе, в докладе об академике А. Я. Купфере охарактеризовал личность А. Я. Купфера — сначала профессора Тбилисского университета, затем академика и профессора педагогического института, Горного института путей сообщения. Основатель и первый директор Российской физической обсерватории, первый крупнейший геофизик, хранитель депо мер и весов и выдающийся русский метролог, крупнейший исследователь и один из крупнейших кристаллографов своего времени. А. Я. Купфер оставил неизгладимый след в мировой науке. Правда, в своих работах он犯了一连串的错误，有些是不可避免的，但有些则是可以避免的。他的工作非常出色，但有时会因为疏忽而被忽视。他对于地球物理学的贡献尤其显著，他在晶体学方面的研究也取得了重要成果。

Значительные работы Купфера в области географии, где он впервые разработал методику измерения углов в кристаллах и дал ряд расчетных методик для геофизики. Купфер особенно прославился исследованиями земного магнитного поля, начиная с 1821 года.

тыми по инициативе Гумбольдта, и частично, проведеными в сотрудничестве с Араго и с известным русским ученым Э. Х. Ленцом. Купфер был создателем русской сети магнитных обсерваторий и крупным метеорологом.

В области метеорологии 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.

Общий дефектом работ Купфера было некоторое злоупотребление методом наименьших квадратов, которое, повидимому, ускользало от его современников.

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 угля, 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 Фарадея называет 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 Омом 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 станов». Обсуждение приняли участники работники Института радиотехники и телемеханики Академии наук СССР, втузов, Министерства металлургической промышленности, треста «Энергометаллургпром», треста «Электромаш», МЭП, треста «Центрэлектромонтаж» МСПТИ, научного научно-технического издательства литературы по черной и цветной металлургии и др.

На конференции был заслушан отзыв о книге техн. наук Л. Б. Гейлера (трест «Электропривод»). Затем состоялся обмен мнениями.

Б. А. Левитанский (Главэнерго ММП), отметил, что в книге необходимо включить критическую оценку, 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 излишна для данной книги; инженерные методы расчета даны недостаточно подробно (развитие переходных процессов в функции напряжения, влияние различных параметров на переходные процессы и т. д.), стабилизирующими трансформаторам удалено 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 «Центрэлектромонтаж») отметил, что тираж книги недостаточен. Для ясности содержания необходимо 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 ценные 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 МОНТОЭ) назвал книгу полезной. Глава вторая, охватывающая вопросы структуры, звеньев, переходных процессов, критерия устойчивости, точности регулирования, — необходима, и определенчя, 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, нения упрощенных регуляторов скольжения. В выражен опыт треста «Электропривод», в особенности по автоматическому управлению электроприводом холодной прокатки. Книга издана и оформлена хорошо.

На конференции выступил студент МЭИ Петрова 5-го курса, А. А. Петровский, специализирующийся на электроприводе. Он отметил, что книга в значительной степени облегчила изучение вопросов автоматического управления и дипломное проектирование для специализирующихся в области электропривода логии.

В заключение авторы — А. Б. Челюсткин и Е. Зенман — обратили внимание участников конференции на трудности, возникшие при составлении рукописи с ограниченным объемом. Некоторые вопросы к составления рукописи были недостаточно разработаны, им не было достаточного опыта (по магнитным усилителям, ионному электроприводу и т. п.). В случае издания книги учтут высказанные пожелания, 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 «Электротехника».

Инженер А. А.



Научно-техническая сессия по электроприводу металлорежущих станков

Всесоюзное научное инженерно-техническое общество энергетиков (секция электропривода и промэлектрооборудования) 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 сконцентрировано 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 перенаправления

ладки станков автоматов для возможности их использования в мелкосерийном производстве и автоматизации вспомогательных операций. В области привода должны быть проделаны работы по совершенствованию непрерывного управления, обеспечивающих возможное плавное изменение 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 с единичным регулированием скорости является система генератор — двигатель с использованием различных электромагнитных усилителей. Наряду с электромашинным усилителем с перечным полем в приводах металлорежущих станков распространение получил электромашинный усилитель с возбуждением, который может быть выполнен в виде нормальной машины постоянного тока. В области мощностей перспективным является ионный привод постоянного тока. Для универсальных станков наиболее целесообразно применение приводов переменного тока, первую очередь приводов с асинхронным двигателем с реключением обмотки на различное число пар полюсов.

Инж. И. Л. Шапиро в докладе «Состояние и перспективы электропривода крупных и средних универсальных станков и тенденции его развития» в основном остановился на приводах тяжелых станков: токарных, расточных, строгальных, разработанных трестом «Электропривод».

Три доклада были посвящены вопросам непрерывного управления электроприводами. Канд. техн. Дранников (ЛПИ) в докладе «Непрерывное управление электроприводами металлорежущих станков» сопоставил различные системы приводов с электромашинным управлением.

Доклад инж. П. В. Маркина (Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков «Бесступенчатый электронно-ионный завод металлорежущих стакнов») был посвященному приводу постоянного тока типа ЭЛИР, разработанному ЭНИМС и выпускаемому заводом низковольтной аппаратуры Министерства станкостроения.

Инж. М. Е. Верхолат (Станкостроительный завод им. Соколова) в докладе «Электрический привод с широким диапазоном регулирования скорости» сообщил о разработанном на заводе приводе, который обеспечивает диапазон регулирования скорости 1:400, с возможностью доведения его до 1:2000. Значительное расширение пределов регулирования скорости в основном достигнуто за счет введения связи по скорости от тахогенератора.

В трех докладах рассматривались вопросы привода разных видов станков. Инж. М. А. Бухбиндер (трест «Электропривод») в докладе «Электропривод токарных и винторезных и карусельных стакнов» отметил, что основным типом привода тяжелых токарных и карусельных станков следует считать привод с регулируемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения. В отдельных случаях может быть эффективным применение системы генератор—двигатель с электромашинами и усилителями. Для привода подачи суппортов, предназначенных для осуществления только токарных работ, может быть рекомендована система генератор—двигатель. Тогда, когда станок предназначается также и для винторезных работ, взамен механической связи между шпинделем и суппортом посредством ходового винта может быть использована чисто электрическая связь типа электрического вала или следящего привода.

Инж. А. П. Зуев (трест «Электропривод») в докладе «Электропривод продольно-строгальных стакнов» отметил, что наиболее рациональным приводом продольно-строгальных станков является привод по генератор—двигатель, причем регулирование скорости целесообразно осуществлять только за счет изменения напряжения генератора; в этом случае сокращается скорость переходных процессов и уменьшаются потери в главной цепи. Применение электромашинных усилий позволяет значительно расширить диапазон регулирования скорости, обеспечить большую жесткость механических характеристик привода, сократить длительность разгона и торможения стола. Наиболее эффективной является система привода с электромашинным усилителем с попечным полем. Ее применение целесообразно в станках большой длины стола, где особенно существенно соотношение времени реверса.

В докладе канд. техн. наук Т. Н. Соколова (ЛПИ) вопросу о выборе электромеханической схемы 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 (ГлавстанкоМежпром) в представляемом докладе «Электрическая аппаратура станкоМежпрома МСС» сообщил о номенклатуре электроизделий, выпускаемых заводами ГлавстанкоМежпрома в настоящее время и о намеченной новой на 1951 г.

В докладах касались отдельных систем приводов. Доктор техн. наук Л. Б. Гейлер (трест «Электропривод») в докладе «Электрический вал на постоянном токе» сообщил о работах, проведенных в лаборатории треста «Электропривод» по исследованию электрического вала, предназначенных для замены механических связей между шпинделем и суппортом в токарных и винторезных станках. Во втором своем докладе «Использование асинхронных короткозамкнутых электродвигателей с повышенным движением для приводов металлорежущих стакнов» Л. Б. Гейлер рассмотрел характерные особенности этих двигателей и указал область их применения с повышенным скольжением, являются ли подходящим типом приводного двигателя для стакнов, характеризующихся преобладанием переходных процессов и электрифицируемых полностью на трех-

фазном 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 стакнов) 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 преимущества. 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, котораяpusчена 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 заграниценные 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 энергетической балансу до сих пор почти не уделялось внимания. Вследствие несовершенства кинематики некоторые станки имеют к. п. д. технологического процесса, т. е. отношение плавленой 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 испытания при последующих разработках.

В ряде выступлений высказывались пожелания усилить работу по обмену опытом в области проектирования, наладки и эксплоатации 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 необходимого возможного упрощения установок автоматизации электропривода с целью обеспечения высокой эксплуатационной надежности.

Сессия нашла своевременным усилить внимание просам разработки методов плавного регулирования скорости двигателей переменного тока.

Сессия подчеркнула необходимость усиления внимания при проектировании вопросам экономической эффективности приводов и отметила, что выбор окончательного варианга электропривода может быть произведен с учетом экономических показателей по первоначальной эксплуатационным затратам.

Сессия особо отметила исключительную важность неотложность создания единой научно-обоснованной миниологии в области электропривода, автоматики управления и регулирования и единой системы усвоения начечий для принципиальных схем промышленной томатики.

Сессия обратила внимание министерств электротехники 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 тропривода в периодической печати и усиления опыта по проектированию, наладке и эксплуатации троприводов металлорежущих станков, сессия выразила желание об организации специального журнала «Тропривод» и о создании в журнале «Станки и машины» постоянного отдела по электрооборудованию ков.

В связи с внедрением различного рода сложных электроприводов станков сессия указала на необходимость усиления работы по повышению квалификации среднего персонала машиностроительных заводов и мастеров, 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. САВИЦКИЙ*



Совещание по газоочистке

В октябре 1950 г. в Москве состоялось междуведомственное 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, общественные 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 разработала много методов очистки различных газов. Создал большое число конструкций газоочистных аппаратов. Отечественные конструкции наиболее эффективных очистных аппаратов-электрофильтров работают в химической, металлургической, бумажной промышленности электростанций, в промышленности строительных материалов и в других отраслях народного хозяйства. Типы советских электрофильтров, как, например, СГ для улавливания сажи, ДМ — для очистки доменного 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 рубежной техники. Трестом разработаны и применены комбинированные двухступенчатые аппараты, состоящие из батарейных циклов и электрофильтров с каркасами из электродами, скомпонованными в одном корпусе. Коэффициент полезного действия таких аппаратов 97—98%.

Был способ полной очистки дымовых газов и сернистого газа. Первая такая установка строится одной из московских электростанций. Она будет из дымовых газов товарную продукцию — жидкостный газ и сульфат аммония. Дымовая труба Энзекской установки окажется излишней. Разработан новый электрический аппарат для тонкой очистки РИОН-С-28. В отличие от обычных электрофильтров этот аппарат процессы зарядки пыли и осаждения пыли. Аппарат отличается малыми габаритами размерами и небольшим расходом электроэнергии на очистку.

В. Алексашенков (НИИОГАЗ) доложил о научно-исследовательских работах НИИОГАЗа в области санитарной очистки газов. Наиболееенным способом устранения загрязнения атмосферного воздуха является ликвидация самих выбросов при их возникновении путем проведения технологических мероприятий. Институт изучает ряд теоретических вопросов электрической очистки газов. Из крупных работ, выполненных институтом, можно отметить: а) влияние форм и электрических параметров электрофильтров от размеров электродов; б) зависимость электрических параметров электрофильтров от размеров электродов; в) электрическая очистка газов двигателей внутреннего сгорания и др.

Б. Л. Шнеерсон выступил с докладом о достижениях в области газоочистки в металлической промышленности. Проф. Л. К. МЭИ им. Молотова) сообщил о результатах исследования золоуловителей — мультициклона и машинного вращающимся ротором, обеспечивающих высокий обеспыливания газов, доходящий до 98%. Доц. Б. Л. Шнеерсон 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 снеготаялок, 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. Гликман (Гипроалюминий) и др.

Совещание приняло резолюцию, в которой намечены практические мероприятия по координации работ в области очистки газов. Создана постоянно 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 ряд организаций Белоруссии и Латвии, связанных с выполнением работ по строительству сельских электростанций.

Совещании приняли участие секретарь ЦК КП(б) Б. Янинин, заместители председателя Совета Министров В. Г. Кудряев и И. Л. Черный, министр сельского хозяйства БССР С. С. Костюк и др.

Выступительном слове И. Л. Черный охарактеризованное положение сельской электрификации, вопросы развития сельской электрификации в Белоруссии и остановился на практических задачах по развитию строительства сельских гидроэлектростанций, в частности, путем применения индустриальных методов производства работ, всенарного использования местных энергетических ресурсов и др.

На совещании были заслушаны доклады: инж. А. М. Кита (Главсельэлектро МСХ СССР) о технических нововведениях сельской электрификации, инж. М. Г. Байдуков (Белорусский строительно-монтажный трест Главсельэлектро) о опыта и путях развития строительства сельскохозяйственных электростанций в Белорусской ССР, инж. Г. Б. Баска (Главэнергоуправление БССР) о тепловых электростанциях и теплоэнергии 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 Вологодская областная научная библиотека

водного хозяйства Госплана БССР) о гидроэнергетических ресурсах БССР и их использовании; инж. С. А. Константинова (Госплан Латвийской ССР) о схеме использования местных энергетических ресурсов Латвийской ССР; инж. В. Я. Виценека о гидроэнергетических ресурсах Латвийской ССР; инж. К. Ф. Иванова (Белорусский государственный проектный институт) о применении сборного бетона в гидroteхнических 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 газов, о строительстве крупных тепло- и гидроэлектростанций для электрификации сельского хозяйства и др. Выступавшие уделяли внимание вопросам комплексного использования гидроресурсов и топливных ресурсов Белорусской ССР и Латвийской ССР.

В результате обмена мнениями совещание приняло развернутую резолюцию, в которой отражены очередные задачи сельских электрифициаторов в области проектирования и строительства сельских электростанций.

Совещание признало безусловно необходимым при строительстве сельских электростанций уделять особое внимание комплексному использованию местных энергетических ресурсов: 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 теплоподаче 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. опыта строительства на одной из гэс с применением сборного бетона по методу Иванова.

Учитывая большое значение для развития сельской электрификации малых энергосистем, совещание целесообразным проведение соответствующих исследовательских и экспериментальных работ с целью определения наиболее рационального типа малой гидроэнергетической системы.

Участники совещания послали товарищу Стальному ответственное письмо.

Инж. А. П. ТЮЛЕНЬКО

*Президент 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 сдаточных 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 машины 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 жали совершенствоваться В. П. Вологдиным и позднее, вплоть до 1930 г.

О значимости работ В. П. Вологдиного сообщал акаад. А. И. Берг сообщающее: «...Вслед за этим была разработана машина высокой частоты, которая из всех машин высокой частоты в мире. Мне пришлось в 1929 г. в работе разговаривать с крупным изобретателем и автором другого типичного машины — профессором Сандерсоном. В беседе со мной профессор, узнав, что я русский, известный ему достижения русской радиотехники и в связи с этим, в первую очередь, машину высокой частоты В. П. Вологдина. Он считал ее самой машиной, автором которой являлся...».

Деятельность Валентина Петровича особенно широко развернулась на фоне Октябрьской социалистической революции. Имя Валентина Петровича тесно связано с деятельностью Нижегородской радиолаборатории со дня ее основания в декабре 1918 г. В 1922 г. работа В. П. Вологдина в Нижегородской радиолаборатории была высоко оценена В. И. Лениным.

В Нижегородской радиолаборатории Валентин Петрович создал высоковольтный ртутный выпрямитель, со своими учениками он разработал серию выпрямителей на различные напряжения. В 1923 г. в мощном радиоцентре 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 на основе слаживающим фильтром, теоретически обосновав явление «псевдовакуума» в ионных выпрямителях, разрабатывает ряд оригинальных схем преобразования переменного тока в постоянный, в том числе известную каскадную схему.

Педагогическую деятельность Валентин Петрович начал в 1907 г. на Женских политехнических курсах, а позже в Женском политехническом институте в Петрограде. 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 первым заводом вакуумной промышленности на машинно-производство.

В период 1928—1930 гг. Валентин Петрович проводил лабораторных работ, в том числе и по использованию нелинейных свойств сегнетовой соли для умножения частоты и по применению титанатов для получения триодов с большими диэлектрическими постоянными. Особенно велики заслуги В. П. Вологодина в области широкого применения токов высокой частоты. На заре разработанных машин высокой частоты Валентин Петрович разрабатывает и внедряет в промышленность индукционные печи, используемые для выплавки различных металлов. В конце 20-х годов им были начаты работы по использованию токов высокой частоты для тепловой обработки металлов, а в 1935 г. он помог развитию на автозаводе им. Сталина высокочастотной заливки коленчатых валов. Этим самым за СССР был задел приоритет в вопросе промышленного применения высокой частоты. Валентин Петрович стал руководителем большой школы специалистов, работающих в этом направлении.

В период 1940—1946 гг. Валентин Петрович разработал и внедрил в промышленность методы пайки твердого припоя в вакууме, метод сварки токами высокой частоты, руководил разработками станков-автоматов и приборов для применения токов высокой частоты, разработал теорию индукционного нагрева металла.

Современно 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 электротехники 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 советским гражданам, 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, 5б, 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 подготовку 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 информации завода, А. М. Коган, внес в это важное многое 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.

Проф. Р. А. НИЛ

Главный инженер Электролампового завода

Заслуженный деятель науки и техники

проф. А. П. ИЛЬИН

Зав. кафедрой МЭИ им. М. В. Ломоносова

Заслуженный деятель науки и техники

проф. Л. Д. БЕЛЫЙ

Зав. кафедрой МЭИ им. М. В. Ломоносова



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 кругом 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 неосвещенной 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. Гутенмехера «Электрические модели» и более подробное — 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.

Не касаясь математического моделирования, заметим, что физическое моделирование в некоторых случаях является незаменимым инструментом научно-технического исследования явлений в электротехнических сооружениях. Сюда, например, относится исследование грозозащиты подстанций; исследование устойчивости и переходных процессов

процессов сложных электроэнергетических систем. В этих подобных случаях изучение явлений математическими методами, хотя бы и с использованием тех или иных современных вычислительных средств, неизбежно будет основана на известных допущениях, проверить которые в полной мере далеко не всегда возможно. Вместе с тем, хорошо известная и тщательно проверенная во всех своих звеньях физическая модель сложной системы может быть вполне надежным средством исследования; это в то же время и наглядное средство, доступное любому инженеру. В физической модели законы природы, как правило, являются в тех же формах, какие свойственны оригиналам.

Таким образом, рецензируемую книгу, отвечающую потребностям ознакомления широких кругов электротехников с принципами физического моделирования, следует признать своеевременной и полезной. Книга является одним из пионеров физического моделирования в области электротехники и главным пионером пренесения в эту область теории подобия, составляя приоритет советских ученых: ему принадлежит большинство работ, посвященных этим вопросам.

Книга содержит, кроме предисловия, введение и ложений, пять глав основного текста, занимающих 148 страниц. В приложениях даны таблицы размерностей и критериев подобия, список обозначений, список литературы, предметный указатель. Имеется значительное число (более 60) рисунков. Глава I посвящена общим и основным понятиям геометрического, физического и математического подобия; физического и математического моделирования. Глава II содержит изложение общих методов определения критериев подобия; III — определение критериев по применительно к частным случаям моделирования. Гл. IV и V, занимающие вместе 70 страниц, т. е. почти половину основного текста, посвящены основам «динамического моделирования электроэнергетических систем». Термин «динамическое моделирование» применен как синоним физического моделирования и служит для того, чтобы подчеркнуть научную базу методов моделирования, выполненных в электрических системах.

помощи вращающихся машин, от так называемых «елей сетей», в которых электрические машины заменяются эквивалентными индуктивно-активными сопротивами. Глава IV содержит изложение общих принципов моделирования электроэнергетических систем, а V — описание элементов конкретной, выполненной автором, мо-
бильной 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, следствие весьма скромного объема книги многих нововведений автор вынужден был касаться лишь бегло. Вероятно, этим и объясняется известный отклик поспешиности и даже местами поверхностности в изложении некоторых разделов книги. Так, например, на первом разделе е), § 3, 2, главы III обещано рассмотрение волновых процессов в асинхронной машине. Однако рассмотрен только частный пример о пересчете волны частотной характеристики; это, конечно, далеко не решает вопроса о волновых процессах в обмотке машины. Едва ли также удовлетворит читателя несколько слов изложения моделирования процессов газового тока (стр. 63—65). Здесь некоторые места довольно ясно понять, они грешат рядом неточностей и это не способствует популяризации предмета. Например, на одной же странице (64) утверждается, что плотность обратно пропорциональна квадрату линейных размеров, с другой стороны, допускается, что плотности обратно пропорциональны линейным размерам. Текст каких-либо оговорок дает нам повод усмотреть ту же автора распространить свои выводы на любой газовый разряд, что представляется нам не вполне вероятным. Это, в частности, относится к таким явлениям, в которых существенную роль могут играть квантовые процессы, не подчиняющиеся макроскопическим критериям подобия. Недостаточно убедительно объяснение фактов расхождения эксперимента с результатами подобия в применении к газовому разряду.

Возвращаясь к общей оценке рецензируемой книги, следует отметить, что имеющиеся в ней мелкие неточности заставляют переоценивать и считать очень существенными. Основные недостатки книги имеют дидактический и отчасти методический характер. Большое количество подстрочных примечаний, содержащих дополнительные пояснения, не может считаться за положительное качество книги основного материала книги: думается, что неточности и неточности формулировок вызывали необходимость правок и дополнений в примечаниях. Вследствие определения некоторых терминов можно найти только в примечаниях, хотя ими автор пользуется в основном: сюда относятся определение масштабов (стр. 11) и критерий аналогов (стр. 37). С той же дидактической точки зрения нельзя признать удачным изложение понятий теории подобия. Действительно, в § 1,5 (2—23) излагаются теоремы подобия с неизбежным изложением понятия критерии подобия, которое еще было достаточно наглядного разъяснения: то определяет критерии подобия, которое можно найти на стр. 11, является совершенно абстрактным и формальным. Понятие этого определения читатель, не ознакомленный с теорией подобия, не сможет составить себе представления о критериях подобия и будет осуждена в полном недоумении, по крайней мере, до 22 страниц. 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 читателя. Вообще, автору, несмотря на изобилие своих примечаний, не вполне удалось сделать текст легко понятным для читателя. Например, на приведенном рис. 1,3, долженствующий иллюстрировать математическое моделирование, но он не достиг цели за отсутствием удовлетворительных пояснений. Наиболее обычный разрез кабеля (рис. 1,3,а) и распределение температуры в кабеле». На стр. 20 приведена таблица — «Подобие в электротехнике», предлагающей собой попытку классификации объектов теории подобия. Эта таблица также дана без всяких обоснований и пояснений, вовсе не будучи безусловно обоснованной 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 $\varphi(a x y)$ имеет вид $\ln a x y + \sin a x y$, то преобразование типа (2,19) невозможно. Спрашивается, что же будет, если $\varphi(a x y)$ будет иметь, например, вид $\ln^2 a x y$ 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 $x_d, x_q, x_p, R, T_c, M_0$; между тем, для достаточного подобия необходимо также моделирование параметров x'_d, x'_q . 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 неосвещенным 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 вызывает необходимости: общую теорию моделирования всех электрических машин, в том числе и трансформаторов, можно было бы основывать на некоторой общей системе уравнений. Впрочем, приватная 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. ЩЕДРИН
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 становыми 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 становами. 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 книге 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 им названием и темой книги, и во многих местах ее уклоняются от вопросов собственно автоматизации в область теории электропривода и его переходных процессов. Конечно, характер протекания последних и относящиеся к ним расчеты тесно связаны с конструированием систем автома-

тического управления. Поэтому можно было бы не жалеть против включения в рассматриваемую книгу некоторых материалов, если бы авторам удалось избежать недостатков в построении книги: теоретически из переходных процессов в книге занимает приблизительно 30% всего содержания и оттесняет на второй план новое содержание книги; между теоретическими каскадами и рассмотрением самих систем управления (выбор параметров, исследование и т. д.) не проведена должная связь.

Как правило, теоретические выводы и формулы без численной проверки или иллюстрации и му для читателей, особенно для работников в эксплуатации прокатных установок, являются недоказанным подспорьем. Примером изложения теоретического материала, не способствующего решению практических задач, может служить гл. «Автоматическое управление возбуждения двигателей реверсивных прокатных станов». Здесь в § 1 авторы перед собой задачу, уже неоднократно привлек к себе внимание наших научных работников (Д. Г. Розов, Н. П. Куницкий), о наиболее рациональном измениении магнитного потока в функции времени разгона или торможения двигателя. Авторы предполагают этот закон $\Phi = f(t)$ исходя из условия малого использования двигателя, т. е. оставляя динамическую составляющую только ту разность токов, которая — в каждый момент времени — определяется одной стороны, током, допустимым (по нагреву и количеству) для двигателя, и, с другой стороны, током статической нагрузки. При всей правильности такой постановки задачи последующие выкладки авторов не могут быть оправданы. Вопрос рассматривается односторонне: является только уравнение движения электропривода учета электрического переходного процесса. Получая даже при таких упрощающих предпосыпках формулы и (211) отличаются большой сложностью и не практического значения, так как зависят от величины статического момента, следовательно, закон изменения потока во времени получается различным для каждого пропуска. Помимо того не указывается, как практика может осуществляться полученная зависимость. Нетки времени разгона и получающихся при этом токов существует, наконец, сравнение предложенного способа изменения магнитного потока с другими применяемыми этого способами. При таких обстоятельствах практика значение проведенного авторами в этом параграфе доказания становится сомнительным.

Вся глава II посвящена целиком элементам автоматического регулирования и представляет собой спектр этой теории, изложенный приблизительно страницах. Включение такого материала в книгу по матизации приводов можно только приветствовать, так как глава II недостаточно связана с остальным содержанием книги, и ее данные и выводы нигде в дальнейшем не применяются. При описании конкретных установок с матическим управлением авторы не прибегают к нему и не освещают таких вопросов, как, например, выбор метров системы автоматического регулирования, проверка устойчивости и пр. Вследствие этого вся глава настоящем построении книги выглядит как обособленная часть.

Наряду с отмеченным наличием в книге некоторого материала можно констатировать отсутствие некоторых коренных вопросов, имеющих непосредственное отношение к теме книги. Так, совершенно не за вопрос об автоматизации управления многослойных и редукционных станов и, в частности, о применимости для них так называемых регуляторов ударного пуска.

В главе XI «Автоматизация технологического прокатки» авторы строят изложение почти исключительно к двигателям постоянного тока, тогда известно, что именно в Советском Союзе в отдельной зарубежной практике автоматизация на металлургических заводах сделала большие успехи на основе приме-

ий трехфазного тока для вспомогательных механизмов обойден молчанием столь важный для автозапуска блюмингов вопрос, как автоматическое управление лежкой для слитков (трансферной) и применение этой цели индукционных выключателей.

Использование средств автоматизации ограничивается электронной автоматикой (в главе III); электромагнитные же, несмотря на все возрастающее их значение, не упомянуты.

В концепции, посвященной целиком вопросам технологического управления, хотелось бы встретить общую главу автоматизации и некоторые данные экономического характера в смысле влияния автоматических установок на улучшение технологического процесса и на производительность труда; однако этого в книге нет. Прек авторам можно поставить и недостаточную ясность изложения некоторых вопросов. В описании машинных усилителей с поперечным полем (стр. 15) мы не находим тех практических данных, которые бы могли помочь читателю в понимании принципа действия таких усилителей и характера их работы.

Вот те же самые замечания можно сделать и в отдельном разделе «стабилизирующие трансформаторы» (120—123). Здесь приводится краткая теория таких трансформаторов и вывод о том, что «для получения мгновенного времени реагирования необходимо стремиться, чтобы постоянные времена цепей первичной и вторичной обмоток были одинаковыми». Однако, как этот вывод может проявляться на практике, т. е. какие принятые для решения при конструировании трансформатора (секущие обмотки, регулируемый воздушный зазор), опять-таки ничего не сообщают.

Для регулятора скольжения приведена довольно ясная теория его работы (стр. 267—271), отсутствует теория с практическими вопросами, возникающими на практике или эксплуатации установок с регулятором скольжения. Авторы ограничиваются только ре-

комендацией того, что «реле обычно должно втягивать якорь при нагрузке, равной $1,5 M_k$, и отпускать якорь при $0,75 M_k$ ». 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 учащихся. 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 МОНИТОЗ.



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(издания 1950 г.)

БАРЦЕВ С. А. РУДНИЧНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ЦИРКУЛЯРНЫХ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК. 476 стр., ц. 23 руб. 75 коп. Госиздат.

БИРЕВ Н. Н. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ, вып. I (МВО СССР. Главное управление по научно-исследовательским работам вузов. Всесоюзный заочный энергетический институт). Учен. совет. Редакционно-издательский отдел ВЗЭИ.

БОДДАКИЙ А. Я. ДУГОВАЯ ЭЛЕКТРОСВАРКА В ИНЕРТНОМ ПРОЦЕССЕ. 246 стр., ц. 12 руб. 40 коп. Машгиз.

БОБЕЕВ Ю. В., КАН А. М., РЕМЕЗОВ В. М., СОКОЛОВ А. Е. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РЕГУЛИРОВКИ ПАРОВЫХ ТУРБИН. Сборник статей под ред. М. З. КОЛДАЧЕВА. 251 стр., ц. 16 руб. Госэнергоиздат.

БОЛДИССАРДИС А. А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЧЕТЧИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ. Издание пятое, переработанное. 223 стр., ц. 10 руб. Госэнергоиздат.

БОЛДИССАРДИС А. А. Основные понятия по измерению мощности постоянного, переменного и трехфазного тока, а также реактивной мощности. Структура счетчиков рассмотрены конструкции счетчиков типа: амперметров, специальных тарифов, образцовыми потерями для электротранспорта и электролитических. Подробно разработаны организационные и производственные работы 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 электромонтёров, занятых учетом электроэнергии и эксплуатацией, проверкой и регулировкой электрических счетчиков постоянного и переменного тока.

БЕМКЕ Р. Г. НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. Издание четвертое. 230 стр., ц. 12 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

Книга по характеру изложения близка к справочнику. В ней содержатся 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 изложены 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 предназначается в качестве справочного руководства для техников, монтёров, машинистов, занятых монтажем и эксплуатацией электрического оборудования, однако круг лиц, который может ею пользоваться, значительно шире.

ГЕРАСИМОВ С. Г., ДУДНИКОВ Е. Г., ЧИСТИЯКОВ 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 теплосыревых 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 ССР. Научно-популярная серия). 80 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Изд-во Академии наук ССР.

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 И. А. ОБМОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. 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 осталой 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 обмеру, эскизированию и некоторым замерам воссоздать заводскую расчетную запись. Даны всjomогательные 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 трансформатором при ремонте. Подробно рассматриваются способы определения состояния изоляции и приведена классификация состояния изоляции. Указаны различные способы изолировки стяги магнитопровода. Описан процесс сборки верхнего ярма и способы изолировки шинлок. Пояснено и квалифицировано излагается технология ремонта и производства новых обмоток. Отдельные операции хорошо иллюстрированы рисунками (западка затяжной петли, укладка последнего витка, отвод пистолета, гибка провода, намотка парных секций и пр.). Излагаются способы пайки. Рассмотрена вакуум-сушка, сушка в подогревных шкафах. Дан разрез вакуум-печи. Приведен элементарный расчет печи с электроподогревом. Описаны печи с индукционным подогревом. Даны указания по операциям прессовки и расклинивки катушек после сушки. Описано, как осуществляются уплотнения. Даны рецепты по армировочным замазкам. Изложены вопросы ремонта переключателей, баков, расширительных, 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. Даны таблица наиболее часто встречающихся неисправностей, указана документация к испытаниям и освещены 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, занятого ремонтом трансформаторов. Однако она является нынешним пособием для конструктора и производственника трансформаторостроения.

КРАНОВЫЕ ТОРМОЗЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И ГИДРАУЛИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ, ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТОД ЧЕТА ВНИИПТМаш. 124 стр., ц. 5 руб. 50 коп. Машина КРЫЛОВ Н. И. ЗАДАЧНИК ПО СУДОВОЙ РАДИОДЕЯТЕЛЬНОСТИ. 148 стр., ц. 7 руб. 60 коп. Связьиздат.

КРЫЛОВ Н. И. ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА. 112 стр., 10 коп. Связьиздат.

ЛАВОРКО П. К., ЛЕВИТСКИЙ С. Г., ГАЛЬВАИ. ПОКРЫТИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ПРИБОРОВ. 232 стр., 60 коп. Украинское отделение Машгиза.

ЛАЙНЕР В. И. ГАЛЬВАНОТЕХНИКА. Пособие для квалификации мастеров. Издание второе, переработанное. 186 стр., ц. 10 руб. 70 коп. Машгиз.

ЛЯПУНОВ А. М. ОБЩАЯ ЗАДАЧА ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЙ. 471 стр., ц. 15 руб. 45 коп. Государственное технико-теоретической литературы.

В этом классическом труде излагаются некоторые решения вопросов о тех свойствах движений и, в частности, которые известны под названием устойчивости и неустойчивости. В главе I дается предварительный анализ, а в главах II—IV — приводится исследование установившихся движений периодических движений. В заключение приведены краткие статьи, написанные А. М. Ляпуновым.

МИХАЙЛОВ Г. П. СВАРКА ТРЕХФАЗНОЙ ДУГОЙ. 7 руб. 65 коп. Машгиз.

ПОПОВ В. С. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Издание третье. Министерство высшего образования ССР в качестве учебника для неэлектротехнических техникумов. 496 стр., ц. 15 коп. Госэнергоиздат.

В книге простым и ясным языком изложены основы техники в применении к нуждам среднего электротехнического промышленных предприятий. Этими объясняется особое уделяемое в книге разделам электрических машин. Вопросы вращения, передачи и распределения электрической энергииены лишь в основных чертах. Все содержание книги разбито на разделы: основы электротехники, куда входит также глава о методах измерениях и приборах, второй раздел — электические машины и преобразователи, включая главу об уходе за машинами, и третий раздел — применение электромашин промышленности, включая главу об электрическом освещении, тросварке, электротермии и главу о производстве, передаче и распределении электрической энергии. Текст иллюстрирован количеством рисунков, а также портретами выдающихся электротехников.

РЕФЕРАТЫ ДОКЛАДОВ НА СОВЕЩАНИИ ПО ЭЛ. НОЙ МИКРОСКОПИИ 15—19 ДЕКАБРЯ 1950 г. (Академия ССР. Отделение физико-математических наук, отделение биологических наук, отделение технических наук). 115 стр., бесплатно. Академия наук ССР.

СУДАКОВИЧ Д. И. ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫЙ ИНСТРУМЕНТ. Допущено в качестве учебного пособия юношеских техникумов строительного и дорожного машиностроения. 228 стр., ц. 8 руб. 50 коп. Машгиз.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ К ОБЛАСТНОМУ СОВЕЩАНИЮ 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 зернотехники). 116 стр., ц. 5 руб. Машгиз.

ЧИМАРГУНОВ К. Н. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОЛОТЫ И ОТБОЙНЫЕ. 120 стр., ц. 4 руб. 90 коп. Машгиз.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ. Труды МГИИИП. Под редакцией В. Д. Алексина. 92 стр., ц. 3 руб. 75 коп. Сборник содержит составленные по результатам научно-исследовательских работ статьи научных работников Московского государственного института мер и измерительных приборов: статей, связанных новыми методами измерения и повышением точности измерений, а также вопросами конструирования и расчета ряда измерительных приборов. В числе помещенных в книге статей — «Метод измерения низких частот с повышенной точностью» (канд. техн. наук Э. С. Лившиц), «Расчет погрешностей воздушных конденсаторов и об одном опыте при этом» (канд. техн. наук М. А. Быков) и др.

ЭЛЕКТРОНAGРЕВ ЗАГОТОВОК ДЛЯ КОВКИ И ШТАМПИ (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 с 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 оконченной 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. Особенность 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*, *p* 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. *O* (нуль) не подчеркивать. Греческие буквы заключать в кружок карандашом.

10. Следует ставить: над символами комплексных величин точки (например *i*), над сопряженными комплексами $\hat{\wedge}$ (например \hat{I}), над векторами — черту (*H*).

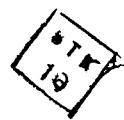
11. При перечислении предпочтительно пользоваться цифрами и во вторую очередь буквами (русского алфавита).

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, гэс, 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 оригинальный текст.



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 кавычках 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 площи рисунка, на свободном поле и на достаточном расстоянии от рисунка.

22. Условные обозначения в площи рисунка должны быть предельно краткими и общеупотребительными. Проставлять их следует простым карандашом, так как надписи тушью в площи рисунка выполняются, в целях единобразия 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.